



E  
G  
K  
S

C  
E  
C  
A

INFLUENCES DE CARACTERE METALLOGRAPHIQUE SUR  
LA RESISTANCE A LA FATIGUE DE L'ACIER Fe 52

Prof. Ing. L. Locati  
Ing. G. Bollani  
M. A. Massa



// Recherche CECA I.C. (Résistance à la fatigue d'aciers pour  
constructions métalliques) //

INFLUENCES DE CARACTERE METALLOGRAPHIQUE SUR LA RESISTANCE  
A LA FATIGUE DE L'ACIER Fe 52

Prof. Ing. L. Locati  
Ing. G. Bollani  
M.A. Massa

## 1. - INTRODUCTION

L'étude de l'influence des paramètres métallographiques sur les propriétés mécaniques, et plus particulièrement sur la résistance à la fatigue de l'acier est très intéressante, aussi bien du point de vue théorique, pour une meilleure compréhension du mécanisme de rupture, que du point de vue pratique, en vue d'une définition correcte des conditions de livraison ou d'essai.

Les recherches dans ce domaine ont été commencées il y a plusieurs années déjà par de nombreux chercheurs qui ont étudié l'importance de la composition chimique, de la microstructure, des inclusions, des précipités, de l'austénite résiduelle et de la décarburation superficielle. Or ces recherches ont parfois abouti à des résultats fortement discordants.

Cette discordance est due au fait qu'il s'agit d'influences complexes, pouvant être attribuées à la présence simultanée de différents facteurs ou alors à des effets d'une envergure relativement petite, facilement masqués par les dispersions dues aux essais.

Nous nous limiterons ici à résumer quelques points définitivement acquis désormais (1), (2), (3), (4), et nous rappelons en premier lieu que:

- 1) sur un échantillon lisse avec des surfaces usinées, la résistance à la fatigue est en relation étroite avec les caractéristiques de tension du matériel (charge de rupture en

cas de fatigue lente; allongement jusqu'à rupture en cas de fatigue très rapide) et donc sensible à tout facteur pouvant produire une variation de ces mêmes caractéristiques.

- 2) sur des échantillons de forme irrégulière, due soit à une entaille, soit à une forte rugosité de la surface, la résistance à la fatigue dépend essentiellement de l'entité de la concentration locale des sollicitations, et donc de la géométrie de l'entaille et de l'aptitude du matériel à la redistribution des tensions par déformation plastique.

La première observation justifie l'influence positive, constatée surtout lors des essais de longue durée sur des échantillons lisses, d'une augmentation du pourcentage de carbone jusqu'à environ 0,8% et en même d'une augmentation correspondante de la dureté (qui ne doit pas dépasser une certaine limite au delà de laquelle se créent des tensions internes excessives) - (3), (5).

De la même façon on peut expliquer l'effet favorable provoqué par l'addition d'éléments d'alliage comme le Mn, Ni, Cr, Mo (2), (3), qui permettent d'obtenir une charge de rupture élevée tout en maintenant basse la teneur en carbone, ce qui est bien entendu avantageux pour d'autres propriétés mécaniques (ductilité, résilience, etc.).

La deuxième observation explique l'effet généralement négatif des inclusions (nature, forme et distribution) - (4), (6), (7) et de certaines structures métallographiques (carbure la-

mellaire: perlite) par rapport à d'autres, plus favorables (carbures sphéroïdaux et finement dispersés: martensite de revenu, bainite) - (2), (8), (9).

L'influence en général nuisible observée pour l'austénite résiduelle dans les aciers alliés améliorés peut enfin être expliquée si l'on tient compte aussi bien de la charge de rupture moindre que des tensions internes de transformation - (5).

L'interprétation de l'influence du grain primaire austénitique sur la fatigue semble être moins claire. Cette influence, qui est en général reconnue comme étant très petite, provient de l'action simultanée de différents facteurs en opposition entre eux, comme la sensibilité à l'effet d'entaille (elle décroît avec l'augmentation des dimensions du grain) - (10), (11), la vitesse de propagation des fissures (pour de basses sollicitations elle augmente avec les dimensions du grain) - (12), (13), et la limite élastique apparente (elle décroît avec la racine carrée des dimensions suivant la relation bien connue de Petch) - (4).

Le problème de la détermination de l'importance de ce paramètre a été pris en considération dans la présente recherche, réalisée sur demande de la Communauté Européenne du Charbon et l'Acier, sur un acier à basse teneur en carbone utilisé fréquemment dans les constructions métalliques. L'étude a été réalisée sur des échantillons prélevés sur des tôles: afin de pouvoir donner un jugement sur l'utilité pratique, nous avons considéré à côté de l'échantillon lisse (usiné ou non

usiné), certains types de joints d'utilisation courante.

La connaissance des valeurs de la résistance à la fatigue des différents types d'échantillons nous a également permis de fixer l'importance des sollicitations admissibles pour notre matériau dans certaines conditions typiques de projet.

En outre, étant donné l'intérêt qui s'est manifesté récemment pour l'utilisation d'aciers ayant une limite d'élasticité plus élevée (par exemple pour les châssis d'automobiles, les conduites forcées, les structures en forme de grilles), on a évalué les avantages, pour la résistance à la fatigue, de traitements thermiques de trempe et revenu plutôt que de normalisation - (14).

## 2. - MATERIEL D'ESSAI

L'acier a été préparé suivant les procédés habituels de fabrication et laminé à une épaisseur de 8 mm (laminage croisé). Il s'agit d'un acier Fe 52 D produit par la Fiat, ayant une teneur de 0,20% de carbone, calmé au silicium et en partie affiné à l'aluminium afin d'obtenir un grain fin contrôlé.

Les caractéristiques de fabrication et les modalités de traitement thermique (normalisation pour les tôles à grain moyen, normalisation ou trempe et revenu pour celles à grain fin) sont indiquées à l'annexe 1.

On a ensuite effectué sur les tôles les contrôles de la-

boratoire suivants:

- 1 - Examen aux ultra-sons: En analysant une grille d'un écart de 50 mm, on ne trouve pas de défauts dans le matériau utilisé pour les essais.
- 2 - Analyse chimique: Les résultats obtenus sur un échantillon des deux types d'acier sont reproduits à l'annexe 2. On constate que, bien qu'il n'ait pas été possible de produire tout le matériel à partir d'une seule coulée, la composition chimique (comme d'ailleurs les autres caractéristiques de fabrication) est, à part l'élément d'affinage Al, pratiquement identique.
- 3 - Examen macrographique:
  - 3.1 - Dans la plupart des tôles, les fibres se développent dans une seule direction, comme il résulte de la figure 1 de l'annexe 3.
  - 3.2 - Les ségrégations (S + P) relevées à l'aide de l'empreinte Baumann sur une tôle de chaque coulée présentent une distribution uniforme et fine: voir annexe 3, figure 2.
- 4 - Examen micrographique:

La structure à l'état normalisé est la suivante:

  - 4.1 - Dimensions du grain austénitique:

- 4.1.1 - Acier à grain moyen (sans addition d'aluminium):  
méthode Mc Quaid Ehn = 4,5 à 6,5: annexe 4 figure 1;  
correspond à  $\emptyset$  moyen = 0,045 mm, c'est-à-dire environ  
600 grains/mm<sup>2</sup>. (+)
- 4.1.2 - Acier à grain fin (avec addition d'aluminium):  
méthode M.Q.E. = 9 à 10: annexe 4, figure 2; corre-  
spond à  $\emptyset$  moyen = 0,012 mm, c'est-à-dire environ  
9.000 grains/mm<sup>2</sup>.
- 4.2 - Dimension du grain ferritique: peu différente du grain  
austénitique, spécialement pour l'acier à grain fin:  
voir annexe 5, figure 1 et 2.
- 4.3 - Structure: ferrite et perlite lamellaire compacte: voir  
par exemple annexe 6, figure 1.

A l'état trempé et revenu, la structure est constituée de bainite et de sorbite: voir annexe 6, figure 2.

Les caractéristiques mécaniques statiques et la résilience de l'acier, résultats obtenus sur les échantillons représentés à l'annexe 7, sont résumés au tableau 8 (chaque donnée est la moyenne de trois essais).

---

(+) Il n'a pas été possible de trouver des échantillons à grains de dimensions plus grandes.



On constate que:

- 1) les caractéristiques correspondent aux prescriptions du tableau UNSIDER 5335 pour le matériel Fe 52 D (normalisé);
- 2) la limite d'élasticité et la charge de rupture présentent des variations d'environ  $2 \text{ kg/mm}^2$  en passant du grain moyen au grain fin: on peut donc logiquement s'attendre à de faibles différences dans la résistance à la fatigue;
- 3) la résilience est fortement influencée par les dimensions du grain (augmentation de 50% environ dans le cas du grain fin) et encore davantage par la direction des fibres de laminage (dans le sens longitudinal elle est deux fois plus grande que dans le sens transversal);
- 4) la direction des fibres ne modifie pas par contre, de façon appréciable les caractéristiques de tension: les échantillons pour les essais de fatigue ont donc été prélevés sans qu'on ait tenu compte de ce facteur.

### 3. - ECHANTILLONS

La forme des échantillons a été définie après qu'on avait effectué une série d'essais préliminaires en vue de vérifier s'ils se prêtaient à notre étude; on a surtout tenu compte des possibilités d'amorce de la rupture de fatigue et de la valeur du rapport de sveltesse (absence de sollicitations secondaires

de la charge de pointe).

On a pris en considération les types d'échantillon suivants:

- |  |   |                           |
|--|---|---------------------------|
| - lisse avec surface non usinée          | } | échantillons              |
| - lisse avec surface usinée              |   | entiers                   |
| - soudé bout à bout                      | } | échantillons<br>assemblés |
| - soudé bout à bout avec cordon aplati   |   |                           |
| - soudé par points à recouvrement simple |   |                           |
| - riveté à recouvrement simple           |   |                           |

Les dessins relatifs sont reproduits aux annexes 9 - 10 - 11 - 12. Les modalités de soudage et de rivetage les plus appropriées qui ont été définies elles aussi au cours des essais préliminaires sont indiquées à l'annexe 13, feuille 1 et 2.

Afin de pouvoir réaliser convenablement les deux types de joints soudés, on a utilisé l'équipement schématisé aux annexes 14 (soudage bout à bout des tôles) et 15 (soudage par points des deux sous-longueurs d'échantillon).

On a fabriqué en tout 456 échantillons dont 126 à grain moyen (normalisé) et 330 à grain fin (204 normalisé, 126 amélioré); pour les détails voir annexe 16.

Par la suite, les échantillons ont été soumis à un contrôle des mesures (pour les détails, voir annexe 17, feuille 1 et 2), radiographique (voir par exemple des figures 18 - 19 - 20) et macrographique (figures 21 - 22 - 23); les résultats ont été satisfaisants.

En dernier lieu on a relevé la résistance à la traction

des différents types d'échantillon: les résultats obtenus sont reproduits en même temps que les caractéristiques moyennes du matériau de base (échantillon lisse) aux annexes 24 et 25.

L'aspect de certaines ruptures statiques des échantillons soudés par points ou rivetés est reproduit aux figures 26 et 27. On constate que pour une largeur de l'échantillon de 60 mm, la rupture peut se vérifier à la limite des éléments de jonction. Afin d'éviter ceci, on a effectué des essais statiques avec une largeur réduite à 40 mm; dans ces conditions, la rupture se produit dans la tôle et peut être comparée à une rupture de fatigue.

Les valeurs de la sollicitation nominale de rupture montrent que, du point de vue statique, les différents types de joints ne produisent pas de concentration de sollicitation appréciable ( $\alpha_k$  statique  $\approx 1$ ). Sur le matériel amélioré cependant, la résistance à la traction peut diminuer et atteindre la valeur du matériau normalisé par suite du réchauffement local subi pendant le soudage.

#### 4. - ESSAIS DE FATIGUE

Les essais ont été effectués sur un pulsateur Schenk de 20 T à la fréquence de 3000 c.p.m. environ, avec un cycle alterné de type symétrique et un cycle pulsatoire (la valeur de la charge initiale a été choisie arbitrairement égale à 100% et à 50% de la limite de fatigue à  $10^7$  cycles, obtenue au cours

des essais à cycle alterné).

En général on a étudié le champ de  $10^5$  à  $10^7$  cycles.

Les résultats obtenus sont indiqués dans les diagrammes des annexes 28 à 45 (en moyenne 10 échantillons par courbe) et résumés au tableau 46. (+)

Les domaines de sécurité pour les différents types d'échantillon sont indiqués aux figures 47 - 48 - 49.

La dispersion de la valeur de la résistance à la fatigue, estimée à environ  $5 \cdot 10^5$  cycles sur un échantillon d'environ 5 éprouvettes pour chaque condition d'essai, est en moyenne

---

(+) La sollicitation nominale indiquée aux diagrammes 40 à 45 et au tableau 46 est calculée conventionnellement de la façon suivante:

- 1) pour l'échantillon soudé par points on divise la charge appliquée par la section résistante, qu'on considère égale à la section totale de la tôle (voir à ce propos l'extension de la zone rompue par fatigue à la figure 52);
- 2) pour l'échantillon riveté on divise la charge par la section nette de la tôle, donc après soustraction de la zone transversale du trou (16 fois 8 mm - voir fig. 53).

la suivante: (++)

- échantillon lisse	$\pm$ 5 %	(brut et usiné)
- échantillon soudé bout à bout	$\pm$ 8 %	(cordon brut)
- échantillon soudé bout à bout	$\pm$ 16 %	(cordon aplati)
- échantillon soudé par points	$\pm$ 12 %	- pour orientation
- échantillon riveté	$\pm$ 8 %	

Toutes les ruptures se sont vérifiées dans la tôle: on trouvera quelques exemples typiques aux figures 50 - 51 - 52 - 53.

On observe que sur un échantillon lisse non usiné, l'amorce se produit indifféremment aussi bien sur la surface du plan que sur le bord; sur l'échantillon usiné, l'amorce se vérifie au contraire toujours sur le bord.

Sur une éprouvette soudée bout à bout, non usinée, la rupture se produit en général avec amorces multiples à partir du cordon de soudure. Sur l'échantillon à cordon aplati par contre on a pu observer également des ruptures avec amorce dans un défaut interne, difficilement décelable à l'aide de mé-

---

(++) Semi-différence entre les valeurs maximum et minimum de l'amplitude de sollicitation correspondantes à  $5 \cdot 10^5$  cycles en fonction de la valeur moyenne et exprimée en pourcentages.  
Les valeurs maximum et minimum de l'amplitude ont été déduites en reportant sur la verticale, parallèlement à la courbe de fatigue, les valeurs extrêmes des durées.

thodes non destructives (voir photographie 54):

Cela explique l'augmentation de dispersions relevée sur ce type d'échantillons.

Comme on pouvait logiquement s'y attendre, sur les éprouvettes soudées par points, la rupture commence dans une des deux zones où la circonférence du point rencontre l'axe longitudinal du solide, alors que sur l'échantillon riveté, elle a son origine dans les deux extrémités du diamètre transversal du trou (section minimum de résistance de la tôle).

## 5. - CONSIDERATIONS SUR LES RESULTATS DES ESSAIS DE FATIGUE

### 5.1. Dimensions du grain

On ne remarque pas de différences significatives entre la tôle à grain moyen et la tôle à grain fin. On observe en particulier que même l'opération de soudage n'introduit pas de différenciations appréciables au détriment du grain moyen, avec éventuellement comme conséquence un grossissement ultérieur du grain. Nos résultats coïncident avec ce qui a été écrit précédemment à ce sujet sur un acier analogue, à teneur moyenne en carbone; dans ce cas, les essais avaient été effectués uniquement sur des échantillons lisses ou entaillés mécaniquement (10).

Dans ce contexte on note une différence par rapport à ce qui a été relevé par exemple pour le laiton 70/30 (11), pour

lequel on a trouvé une réduction de la résistance à la fatigue à  $10^7$  cycles de 15 à 20% (sur échantillon lisse) en passant d'un grain de diamètre moyen de 0,012 à 0,045 mm.

## 5.2. Normalisation ou trempe et revenu

Sur des échantillons entiers, la structure améliorée présente des avantages (dans la mesure prévue par l'augmentation de la charge de rupture) uniquement avec des surfaces usinées. On note un comportement analogue des échantillons rivetés.

Sur les éprouvettes soudées bout à bout ou par points, l'influence du traitement de trempe et revenu s'est avérée très faible, probablement à cause du recuit subi par le matériau dans la zone d'amorce de la fissure, qui coïncide avec la zone thermiquement altérée.

A ce propos on observe que la dureté de la tôle améliorée adjacente au cordon de soudure atteint une valeur minimum de 200 HV, égale à celle de la tôle normalisée (voir diagramme 55 et 56).

Une différenciation en faveur du matériel trempé et revenu n'a été obtenue que pour des durées plus courtes que celles reportées au tableau 46; par exemple pour l'échantillon soudé bout à bout, non usiné, la résistance à la fatigue à  $10^4$  cycles est de  $\pm 35,5 \text{ kg/mm}^2$  pour le normalisé, alors que pour l'amélioré elle est de  $\pm 45 \text{ kg/mm}^2$ .

### 5.3. Soudage et rivetage

Par rapport à la sollicitation nominale, la résistance à la fatigue avec cycle alterné des divers types d'assemblage est en moyenne la suivante:

#### à $10^5$ cycles

échantillon soudé bout à bout (brut)	=	$\pm$ 22	kg/mm <sup>2</sup>
échantillon soudé par points	=	$\pm$ 6,5	kg/mm <sup>2</sup>
échantillon riveté	=	$\pm$ 19	kg/mm <sup>2</sup>

#### à $10^7$ cycles

échantillon soudé bout à bout (brut)	=	$\pm$ 14	kg/mm <sup>2</sup>
échantillon soudé par points	=	$\pm$ 2	kg/mm <sup>2</sup>
échantillon riveté	=	$\pm$ 12	kg/mm <sup>2</sup>

La résistance du joint riveté s'avère quasiment égale à celle du soudage bout à bout sans usinage du cordon; toutes les deux sont bien supérieures à celle du soudage par points.

Par conséquent le coefficient expérimental d'entaille ( $\alpha_s$  = rapport entre la résistance à la fatigue sur éprouvette entière brute et sur éprouvette assemblée, à égalité de durée) pour un assemblage par soudage par points, est beaucoup plus élevé que celui d'un assemblage par rivetage de forme analogue.

Dans des essais successifs on s'est en outre aperçu que ce coefficient ne présente pas de variations sensibles en fonc-



tion de la largeur de l'échantillon (+), et on peut donc le considérer en première approximation comme un élément caractéristique du joint, inversement proportionnel au degré d'utilisation du matériau.

A  $10^7$  cycles, pour des assemblages à recouvrement simple, on peut considérer  $\alpha_s = 8$  à 10 dans le cas de soudage par points et  $\alpha_s = 1,5 + 2,0$  dans le cas de rivetage. (++)

---

(+) Entre 60 et 30 mm, cette dernière condition correspondant à un élément d'assemblage prélevé dans une succession de points ou de rivets se trouvant entre eux à la distance minimum admissible.

(++) Ceci s'explique si l'on tient compte du plus petit coefficient de forme de l'échantillon ou de l'importance de l'interférence réalisée pendant le rivetage à froid (expansion du corps du clou dans le trou de la tôle). Pour une description plus détaillée de l'augmentation de la résistance à la fatigue pouvant être obtenue par un assemblage à interférence par effet de charge initiale, due aux tensions internes (réduction de l'amplitude du cycle de sollicitation dans la section critique), on peut consulter par exemple la bibliographie (15).  
Pour évaluer l'importance des tensions internes présentes dans nos échantillons, nous avons mesuré la charge de limite d'élasticité de chaque rivet en obtenant les valeurs suivantes:

- échantillon normalisé	6600	7800	kg
- échantillon trempé et revenu	6700	7200	kg

Pour une charge moyenne de 7000 kg on a une sollicitation tangentielle (nominale) de  $7000/\pi \cdot 16 \cdot 2 \cdot 8 = 8,7 \text{ kg/mm}^2$

En prenant un coefficient de frottement de 0,4 à 0,5, on obtient par exemple une sollicitation radiale sur la tôle

Pour mieux faire ressortir et compléter la comparaison, nous indiquons aussi les valeurs de la charge alternée, exprimée en kg, subie par l'échantillon lisse et les différents types d'assemblage, à  $10^7$  cycles, se référant à une largeur constante de 60 mm:

- échantillon lisse (surface brute)	=	$\pm$ 10.600 kg
- échantillon soudé bout à bout (brut)	=	$\pm$ 6.700 kg
- échantillon soudé par points	=	$\pm$ 950 kg
- échantillon riveté	=	$\pm$ 4.200 kg

Le rendement de l'assemblage (rapport en pourcentage entre les charges exercées sur le joint et par la tôle entière), trouvé à partir des données ci-dessus, est le suivant:

1) soudage bout à bout	=	63 %
2) soudage par points	=	9 %
3) rivetage	=	40 %

---

(++) au bord du trou de  $20 \text{ kg/mm}^2$ . Cela entraîne une sollicitation tangentielle maximum, toujours au bord du trou, de  $23 \text{ kg/mm}^2$ , donc égale à 50% de la limite d'élasticité et par conséquent suffisante pour influencer sensiblement la durée de la résistance à la fatigue. En effet on observe que le coefficient de forme théorique de l'échantillon à trou libre vaut 2,4 (16), valeur bien plus grande que celle rencontrée lors des essais de fatigue (inférieure à 2,0).

#### 5.4. Finissage des surfaces

L'usinage mécanique des faces de l'échantillon avec finissage  $R_a = 1,5 \div 2,0 \text{ } \mu\text{m}$  au lieu de  $R_a = 2,0 \div 4,0 \text{ } \mu\text{m}$  produit une augmentation de 20 à 30% de la limite de fatigue à cycle alterné, que ce soit sur échantillon lisse ( $\pm 26 \text{ kg/mm}^2$  contre  $\pm 22 \text{ kg/mm}^2$ ) ou sur échantillon soudé bout à bout avec cordon aplati ( $\pm 20 \text{ kg/mm}^2$  contre  $\pm 14 \text{ kg/mm}^2$ ).

Dans le cas d'échantillons soudés, cependant il est nécessaire, en même temps, de soigner particulièrement l'exécution de la soudure pour éviter la possibilité de fortes dispersions des valeurs de la résistance à cause de défauts non identifiables de l'extérieur.

#### 6. - CONCLUSIONS

6.1. Dans le cas d'un acier doux normalisé de type traditionnel, tel le Fe 52 D, une élaboration à grain fin (>6 ASTM) ne présente pas d'avantages appréciables du point de vue de la résistance à la fatigue. Ceci est en accord avec ce qui a été écrit précédemment dans la littérature spécialisée au sujet d'un échantillon entier en acier semi-dur avec une résistance statique semblable à la nôtre (9), confirmé par nos essais, également pour des échantillons assemblés par soudage ou rivetage.

6.2. L'acier à grain fin manifeste cependant sa supériorité dans le cas de la structure sollicitée par choc, et plus généralement contre le danger de rupture fragile, puisqu'il possède une résilience nettement supérieure (nous avons relevé une augmentation de 50%). A ce sujet il faut cependant rappeler que l'orientation des fibres de laminage peut avoir une influence même plus prononcée (la résilience étant environ double dans le sens longitudinal).

6.3. Le traitement de trempe et revenu de l'acier, dans les constructions de structures sollicitées par fatigue, a une utilité limitée (jusqu'à 20%) dans le cas de joints rivetés et est même négligeable dans le cas de joints soudés.

A part le facteur économique et les difficultés de réalisation à cause des distorsions bien connues des tôles, la trempe et le revenu ne nous semblent appropriés que pour des ensembles sujets à une charge statique ou à un nombre limité de cycles d'une sollicitation très élevée.

6.4. Dans le cas de rupture amorcée dans la tôle, la limite de fatigue du joint riveté à recouvrement (sollicitation nominale =  $\pm 12 \text{ kg/mm}^2$ ) est de loin supérieure à celle d'un joint soudé par points de géométrie analogue ( $\pm 2 \text{ kg/mm}^2$ ) et s'approche de celle d'une soudure bout à bout continue sans usinage du cordon ( $\pm 14 \text{ kg/mm}^2$ ).

Un jugement analogue est également valable en termes de rendement de l'assemblage, c'est-à-dire du pourcentage de

charge transmise par un joint par rapport à la tôle entière à égalité de largeur:

soudure bout à bout = 63 %

rivetage = 40 %

soudure par points = 9 %

Dans le cas où une résistance très élevée n'est pas requise, ou en cas de difficulté d'exécution de la soudure continue, nous estimons que le rivetage est acceptable.

- 6.5. Dans le cas de finissage superficiel des faces de l'échantillon à  $R_a = 1,5 \div 2,0 \text{ } \mu\text{m}$  au lieu de  $2,0 \div 4,0 \text{ } \mu\text{m}$ , on a pu obtenir une légère augmentation de la limite de fatigue ( $20 \div 30\%$ ).

Dans le cas d'un joint soudé bout à bout, cela ne vaut cependant que si le cordon est exécuté avec des soins particuliers (éviter les défauts internes), et poli par la suite.

Pour des raisons pratiques, l'usinage de la surface de la tôle ne peut être justifié qu'en cas d'usages très particuliers, dans lesquels on désire obtenir le maximum de résistance à la fatigue en acceptant un coût plus élevé.

B I B L I O G R A P H I E

1. L. Locati - "La fatica dei materiali metallici" - U. Hoepli - Milan - 1950
2. R. Cazaud - "La fatigue des métaux" - Dunod - Paris 1959
3. P.G. Forrest - "Fatigue of metals" - Pergamon Press - Oxford - 1962
4. T. Yokobori - "Strength, fracture and fatigue of materials" - Noordhoff - 1965
5. H.E. Frankel et al. - "Fatigue properties of high strength steels". Trans. A.S.M. 52, 1960, p. 257 + 276
6. T. Cummings et al. - "Relation of inclusions to the fatigue properties of SAE 4340 steel" - Trans. A.S.M. 49, p. 482 + 516, 1957
7. F. De Kazinczy - "Size effect in fatigue of cast steel" - Journal of the Iron and Steel Institute - 1969, 1, p. 40 + 43
8. G.E. Dieter - "The statistical fatigue properties of lamellar and spheroidal eutectoid steel" - Trans. A.S.M. 47, 1955, p. 423 + 439
9. F. Borik et al. - "The effect of microstructure on the fatigue strength of a high carbon steel" - Trans. A.S.M. 53, 1961, p. 447 + 463

10. C. Massonnet - "The effect of size, shape and grain size on the fatigue strength of medium carbon steel" - Proc. ASTM 56, 1956, p. 945 ÷ 978
11. R.W. Karry - T.J. Dolan - "Influence of grain size on fatigue notch sensitivity" - Proc. ASTM 53, 1953, p. 789 ÷ 804
12. C. Laird - "The influence of metallurgical structure on the mechanisms of fatigue crack propagation" - ASTM Special Technical Publication n° 415 - 1967
13. M. Klesnil et al. "Some aspects of the fatigue process in lowcarbon steel" - Journal of the Iron and Steel Institute - 1965, 1, p. 47 ÷ 53
14. T.F. Pearson et al. "Quenched and tempered plate steels" - Journal of the Iron and Steel Institute - 1967, 3, p. 257 ÷ 263
15. R.B. Heywood - "Designing against fatigue" - Chapman and Hall, 1962
16. R.E. Peterson - "Stress concentration design factors" - John Wiley & Sons - N.Y. - 1953.

Annexe 1  
(feuille 1)

CARACTERISTIQUES DE FABRICATION DE L'ACIER

1) GRAIN MOYEN

Elaboration de l'acier	: Fusion de déchets de qualité connue au four à haute fréquence basique de 2 tonnes
Nuance d'acier	: Calmé au Si
Température de coulée	: 1520°C environ
Coulée	: Directe, en lingots avec masse-lotte exothermique
Poids lingot	: 2120 kg
Additions	
- dans la charge	: Fe Si Mn 15 kg Fe Mn 13 kg
- dans le four	: Fe Si 2 kg Fe Si Mn 10 kg
Laminage	
- brame	: Enfournement du lingot à chaud (1 h 50' après coulée) température du four à l'état d'équilibre: 1270°C permanence dans le four: 8 h env.



Annexe 1  
(feuille 2)

- : température de début de laminage: 1200°C
  - température de fin de laminage: 910°C
  - direction de laminage: longitudinale
  - production: 3 brames 500 x 105 x 1150 mm
- tôle
  - : écroûtage normal au chalumeau
  - réchauffage à partir de la température ambiante en four poussant continu à 1330°C pendant 20 minutes
  - laminage au trio Lauth jusqu'à 8 mm d'épaisseur
  - température de fin de laminage: 840°C
  - direction de laminage: transversale et longitudinale
- Normalisation
  - : 920°C pendant 20 minutes; refroidissement à l'air sous atmosphère calme
- Décapage
  - : Bain de  $H_2SO_4$  à 10% à 70°C
- Polissage et équarrissage

Annexe 1  
(feuille 3)

Contrôle de surface

Contrôle des dimensions et des caractéristiques mécaniques  
(v. annexe 3)

Produit: n° 17 tôles 1000 x 100 x 8 mm

2) GRAIN FIN

Elaboration de l'acier : Fusion de déchets de qualité connue au four à haute fréquence basique de 2 tonnes

Nuance d'acier : Calmé au Si, à grain contrôlé par addition de 0,45 kg/t de Al en gouttes

Température de coulée : 1520°C environ

Coulée : Directe, en lingots avec masselotte exothermique

Poids lingot : 2100 kg

Additions

- dans la charge : Fe Si Mn 15 kg  
Fe Mn 13 kg

- dans le four : Fe Si 2 kg  
Fe Si Mn 10 kg

Annexe 1  
(feuille 4)

dans la poche : Al 0,95 kg

Laminage et usinage  
successifs : comme pour la coulée précédente

Normalisation : 920°C pendant 20 minutes: re-  
froidissement à l'air sous  
atmosphère calme

Trempe et revenu (seule-  
ment une partie des tôles): réchauffage au four à 880°C;  
trempe dans H<sub>2</sub>O (en forme) ré-  
chauffage à l'air à 530°C

Produit : 11 tôles 1000 x 1000 x 8 mm  
50 pièces 400 x 250 x 8 mm  
(améliorés)

## Annexe 2

### COMPOSITION CHIMIQUE DE LA TOLE

#### à grain moyen

C	=	0,21
Mn	=	1,60
Si	=	0,25
P	=	0,035
S	=	0,01
Ni	=	0,08
Cr	=	0,13
Cu	=	0,13
Mo Co	=	0,01
Al	=	0,005

#### à grain fin

C	=	0,20
Mn	=	1,60
Si	=	0,20
P	=	0,035
S	=	0,01
Ni	=	0,08
Cr	=	0,12
Cu	=	0,12
Mo Co	=	0,01
Al	=	0,03



Fig. 1 - Examen macrographique de la tôle (x2)

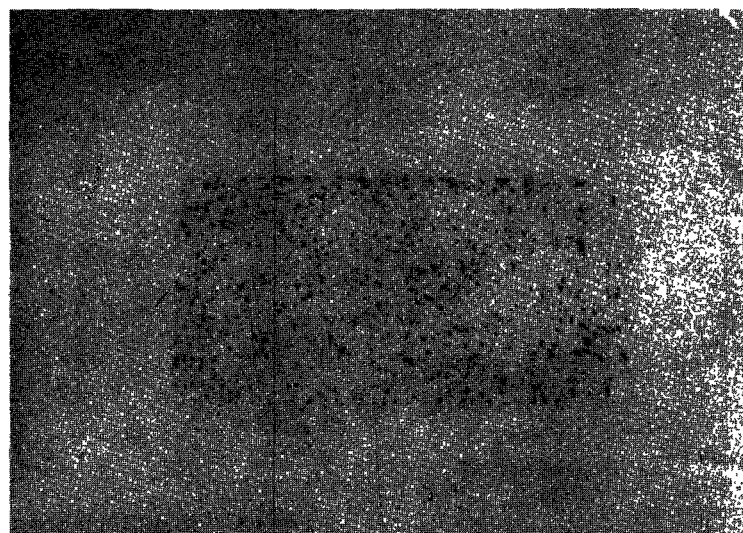


Fig. 2 - Analyse des ségrégations (x2)

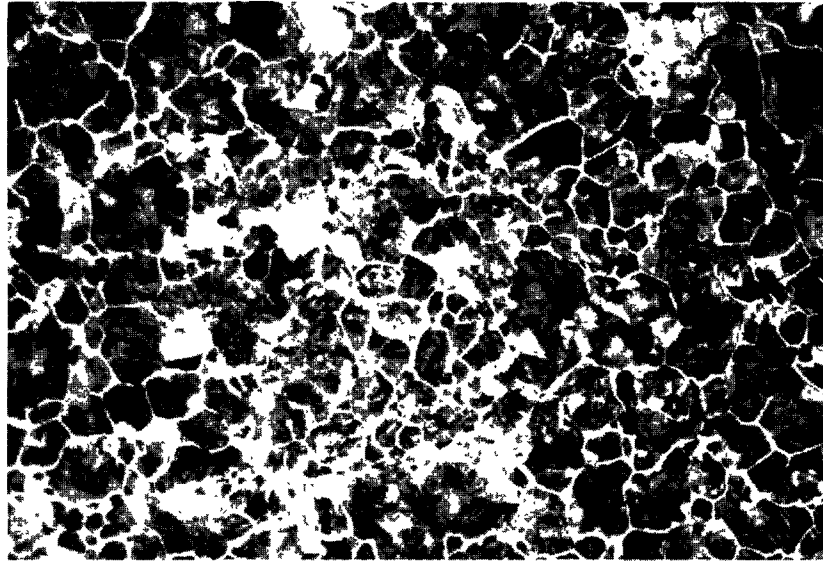


Fig. 1 - Tôle normalisée - Grain austénitique moyen  
(x100)

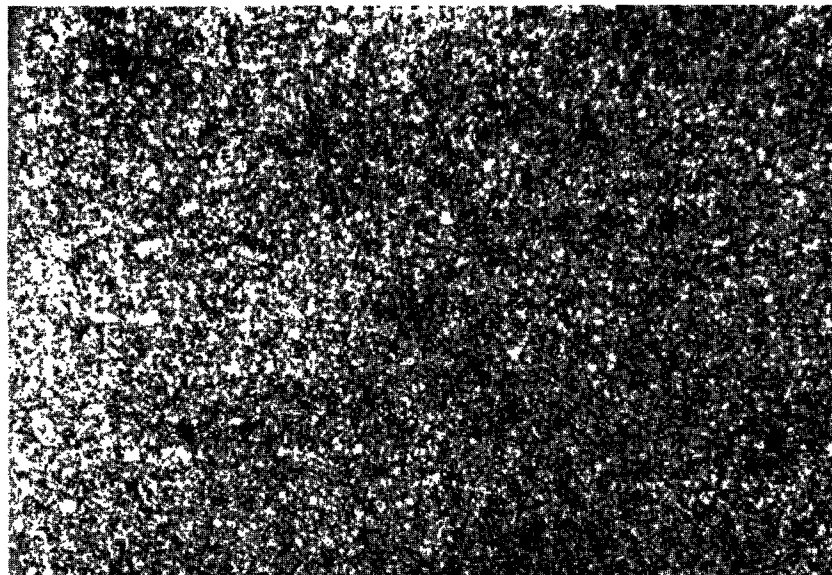


Fig. 2 - Tôle normalisée - Grain austénitique fin  
(x100)

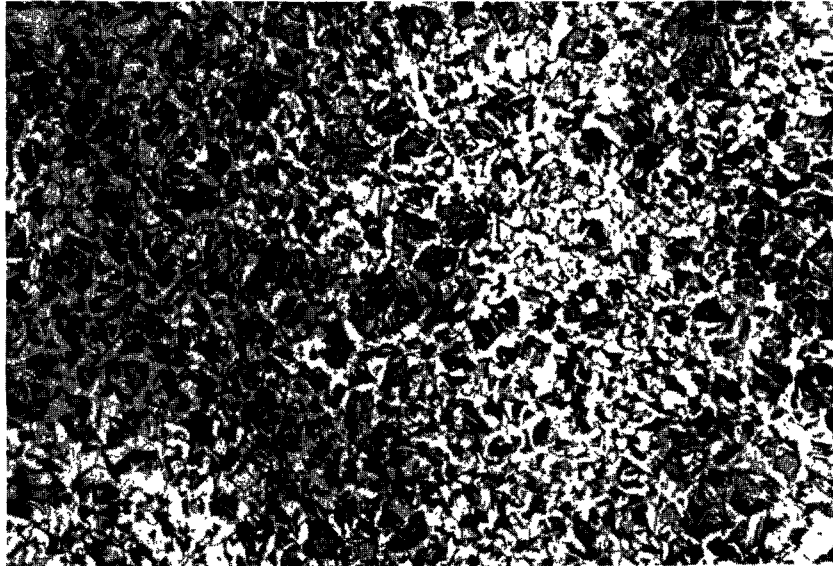


Fig. 1 - Tôle normalisée - Grain ferritique moyen  
(x100)

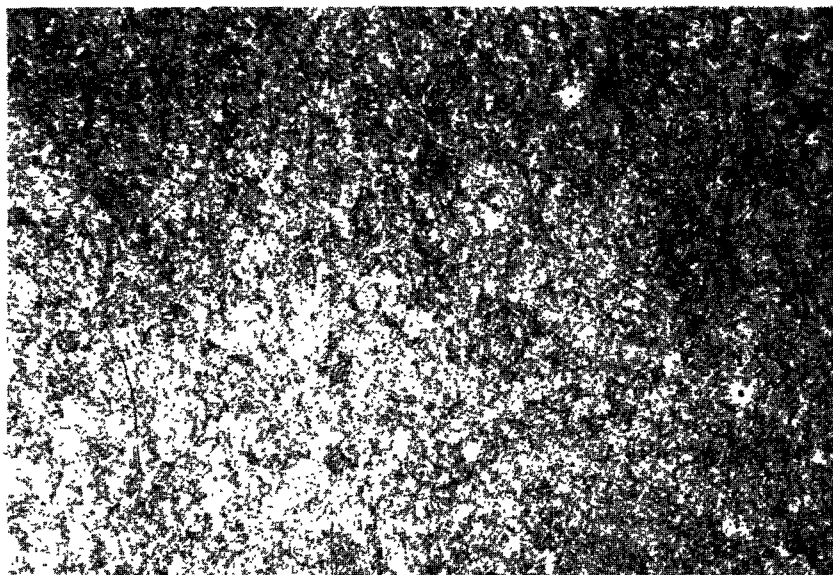


Fig. 2 - Tôle normalisée - Grain ferritique fin  
(x100)

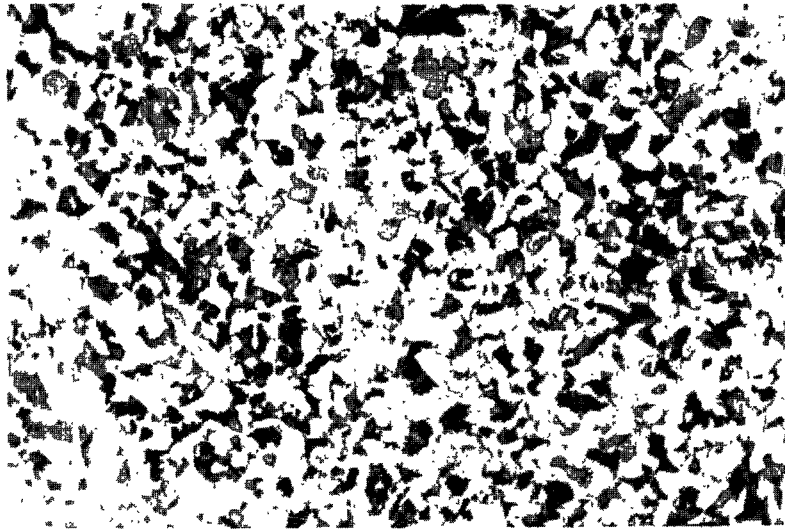


Fig. 1 - Tôle normalisée à grain fin:  
structure ferritique - perlitique (x350)

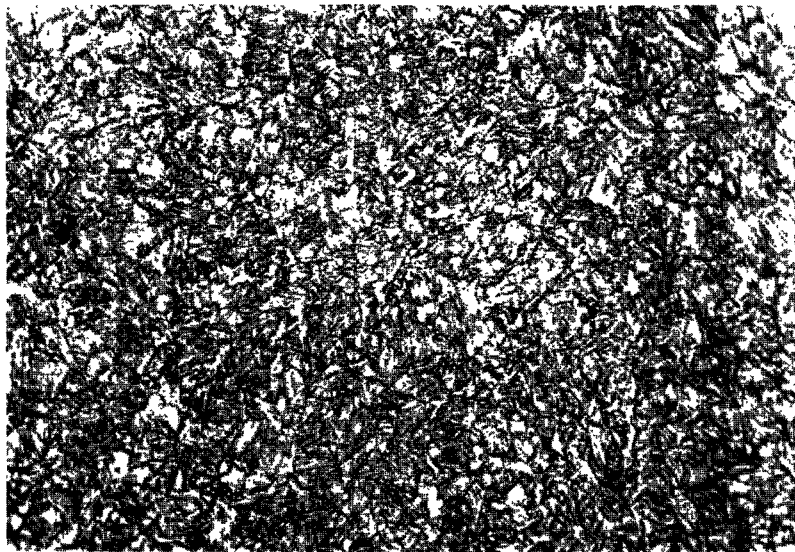


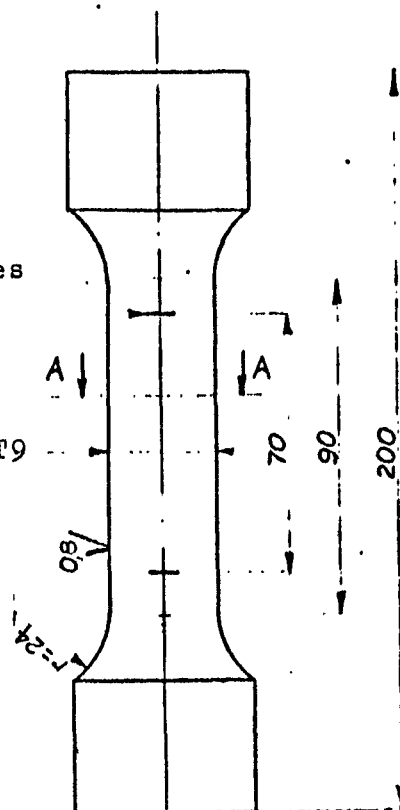
Fig. 2 - Tôle améliorée à grain fin:  
structure bainitique - sorbitique (x350)



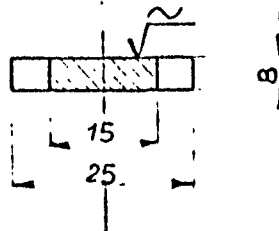
## ECHANTILLON DE TRACTION

Toll. de parallélisme des  
marques IT9

Toll. de parallélisme IT9

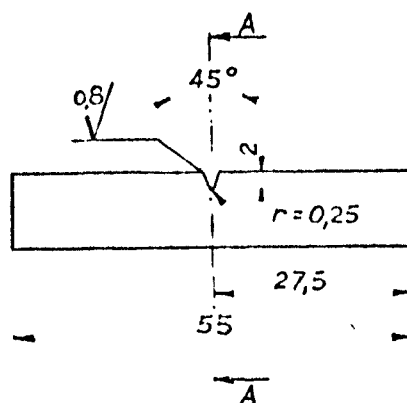


SECT. .A-A



## ECHANTILLON DE RESILIENCE

3/



SECT. A-A

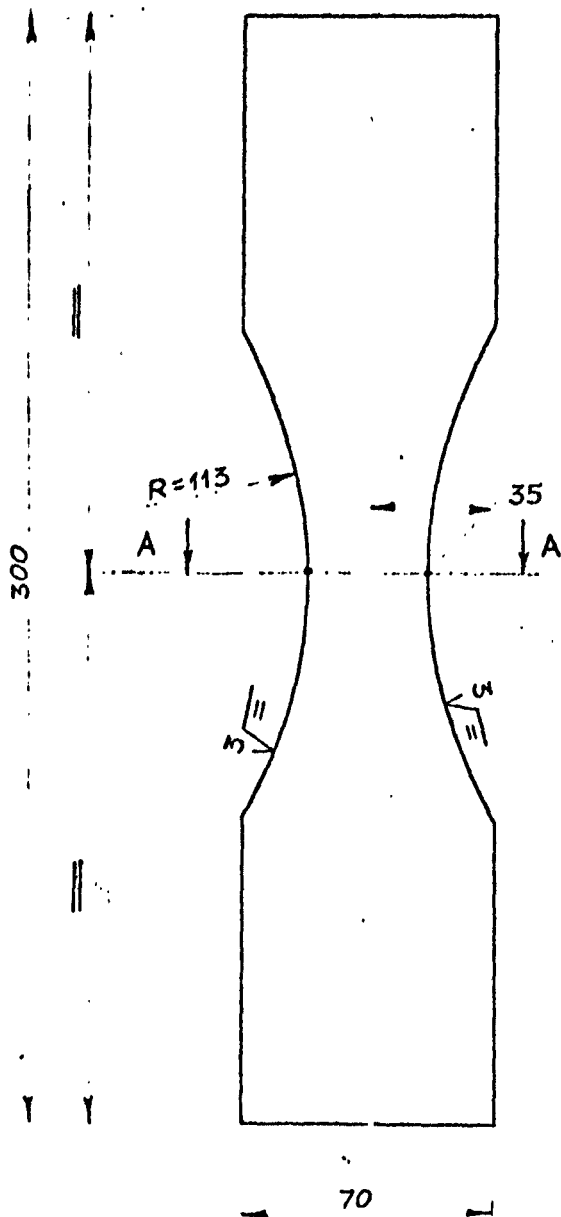
Annexe 8

CARACTERISTIQUES STATIQUES DE L'ACIER

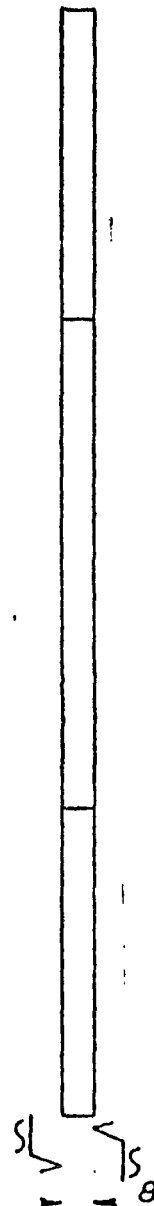
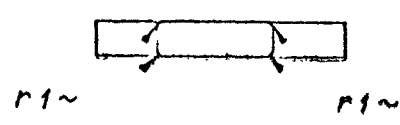
	Grain moyen		Grain fin			
	normalisé		normalisé		amélioré	
	long.	transv.	long.	transv.	long.	transv.
limite d'élasticité ( $S_{0,2}$ ) $\text{kg/mm}^2$	42,5	41,5	44,5	42,5	71,5	71,0
charge de rupture $\text{kg/mm}^2$	63,0	62,5	61,0	60,5	78,5	77,5
allongement ( $A_{p5}$ ) %	27,5	31,5	28,5	32,0	20,5	18,5
résilience KV (23°C) $\text{kgm/cm}^2$	12,5	6,5	17,5	9,0	14,0	7,0

ECHANTILLON LISSE

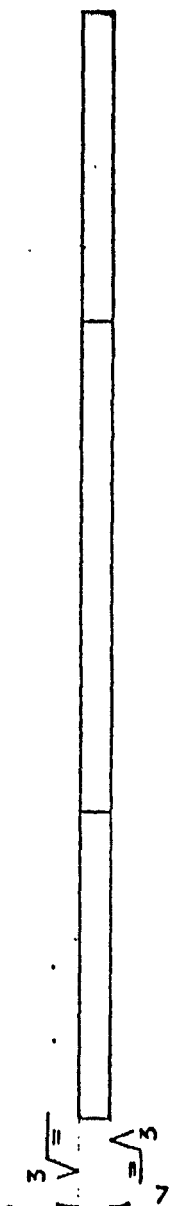
- (A) surfaces brutes et bords usinés
- (B) surfaces et bords usinés



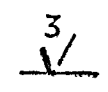
SECT. A-A



(A)

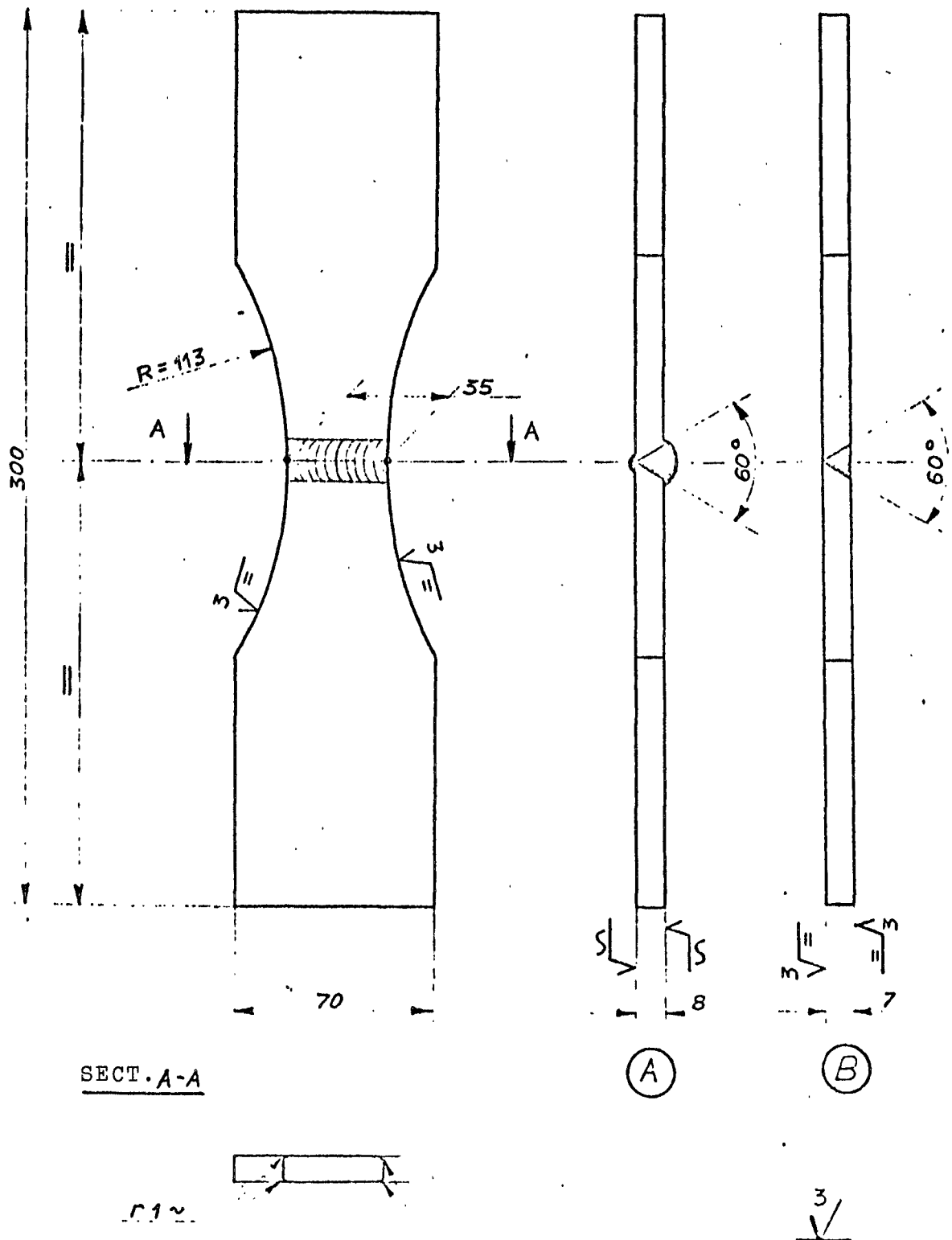


(B)

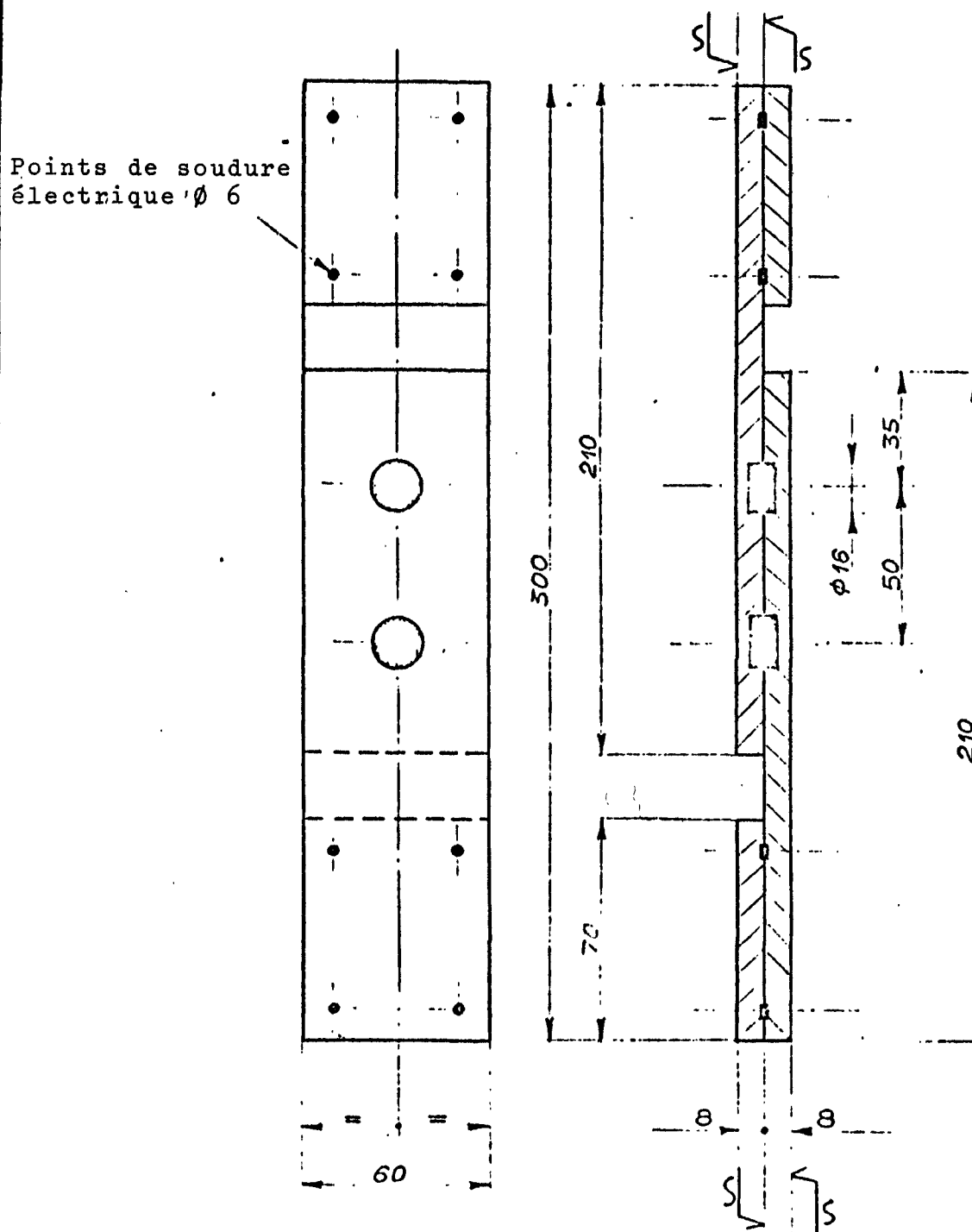


ECHANTILLON SOUDE BOUT A BOUT

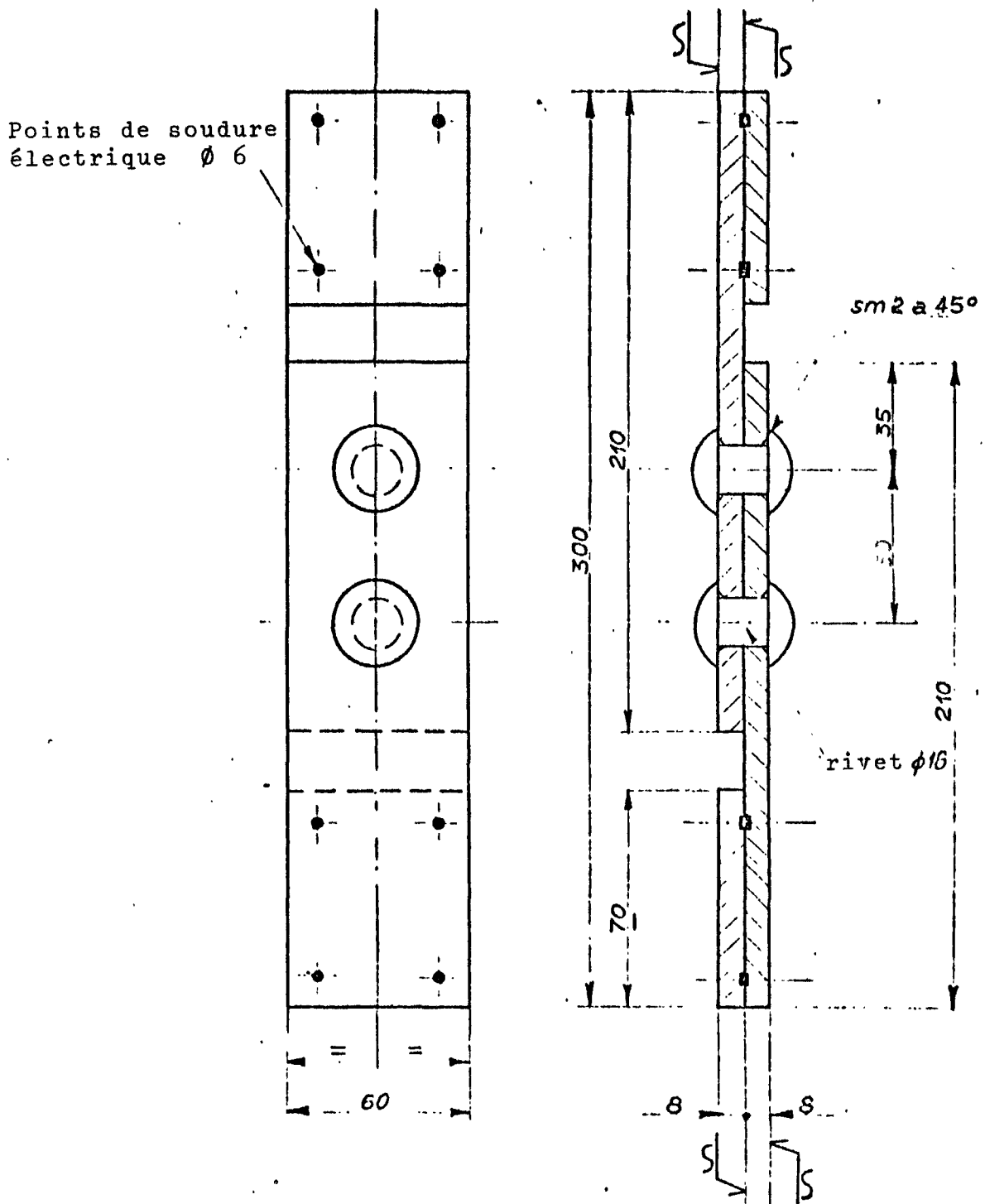
- (A) surfaces brutes et bords usinés
- (B) surfaces et bords usinés; cordon aplati



ECHANTILLON SOUDE PAR POINTS



## ECHANTILLON RIVETE



Annexe 13  
(feuille 1)

MODALITES DE SOUDAGE ET DE RIVETAGE DES ECHANTILLONS

1) Soudage bout à bout:

a) préparation de la tôle:

- coupe mécanique (150 x 750 mm)
- biseautage du bord à souder à la fraise avec un angle de 30° (angle du cordon 60°)
- mise en place de la tôle dans un dispositif construit spécialement pour éliminer les déformations pendant le soudage: voir croquis annexe 14.

b) électrodes:

- désignation: supercytobasique 60 (pour l'acier normalisé)  
Diamas BF2T (pour l'acier amélioré)
- diamètre: 3,25 mm (2,5 mm pour la première passe)
- revêtement: basique
- caractéristiques mécaniques:

	Supercytobasique 60	Diamas BF2T
R min kg/mm <sup>2</sup>	58	77
Ap 5%	28	16

c) paramètres de soudage:

- 4 passes à l'endroit suivies d'une passe à l'envers

Annexe 13  
(feuille 2)

- courant continu; polarité positive
- intensité: 40 A/mm rapportée au diamètre de l'électrode.

2) Soudage par points:

a) préparation des sous-longueurs d'échantillon:

- coupe et finissage à la machine-outil
- mise en place des sous-longueurs dans un dispositif construit spécialement pour éviter les erreurs de mise en place et les déformations pendant le soudage: voir croquis annexe 15.

b) électrodes:

- diamètre de l'extrémité (plate) = 16 mm
- diamètre du corps = 42 mm
- angle de conicité =  $15^{\circ}$

c) paramètres de soudage:

- charge de soudage = 3800 kg
- temps de réchauffage = 0,20 sec/impulsion
- temps de refroidissement = 0,08 sec/impulsion
- nombre d'impulsions = 26
- tension primaire (triphasée) = 500 V
- courant primaire = 150 A



Annexe 13  
(feuille 3)

3) Rivetage:

a) préparation des sous-longueurs d'échantillon:

- coupe et finissage à la machine-outil

b) rivets:

- matériel C21R tréfilé à froid

- composition chimique: C = 0,18 ÷ 0,24

Mn = 0,3 ÷ 0,6

Si = 0,10

S = 0,04

P = 0,04

- caractéristiques mécaniques: R = 48 ÷ 62 kg/mm<sup>2</sup>

Ap5 = 16%

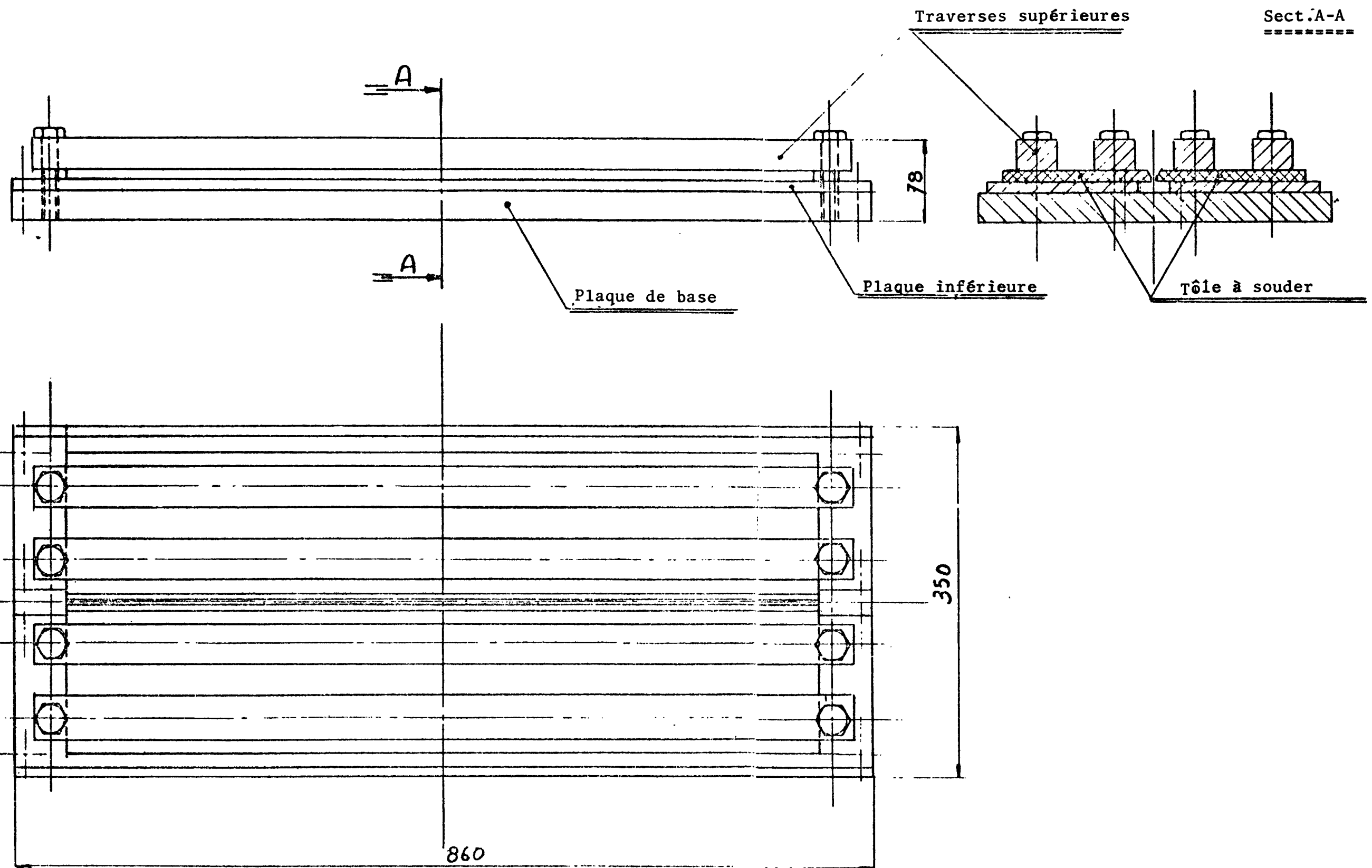
- diamètre: 16 mm

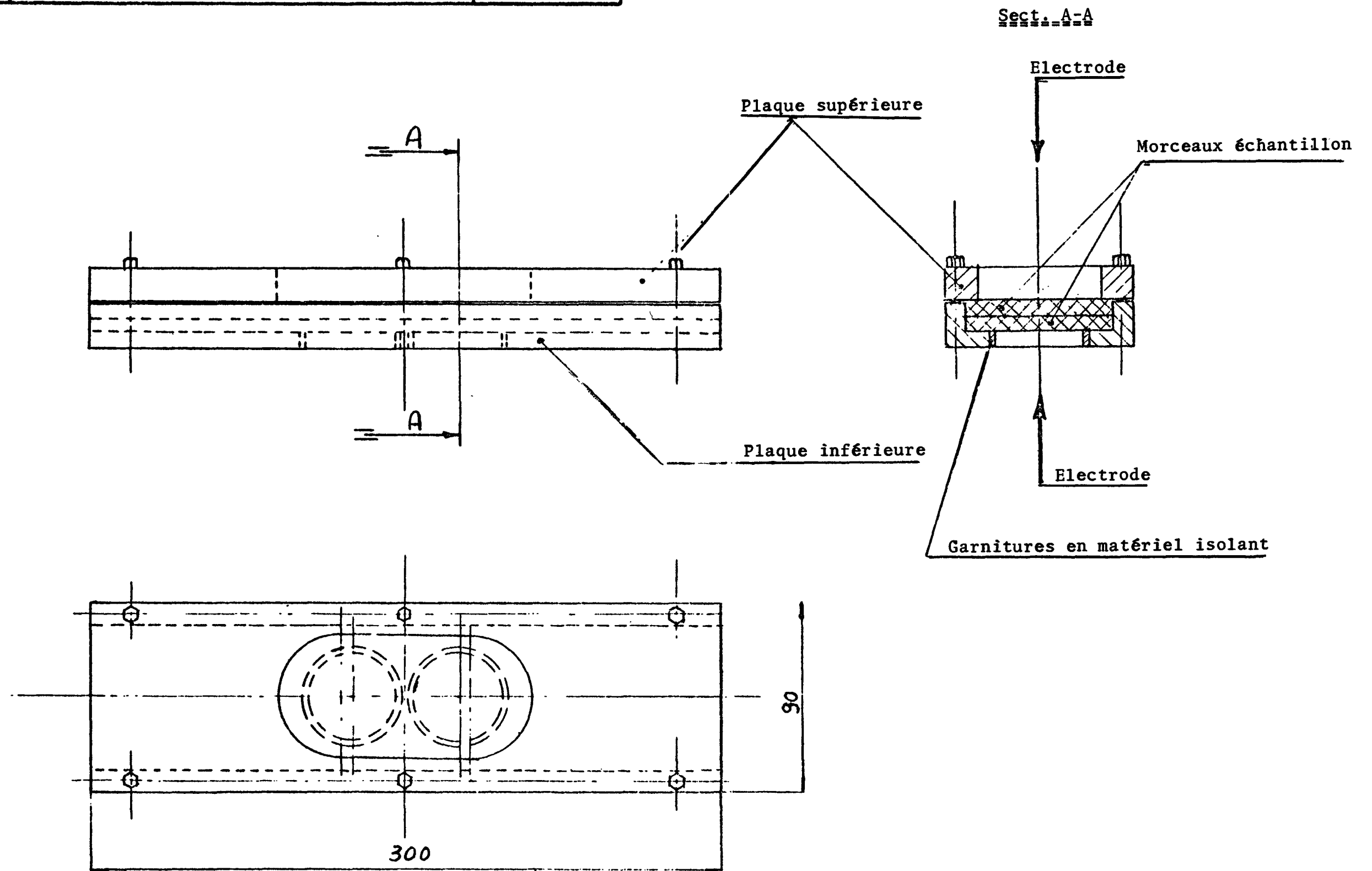
- longueur: 40 mm

c) paramètres de rivetage:

- rivetage à froid

- charge d'écrasement 15 t





ETAT DES ECHANTILLONS' (total 456)

Acier Fe 52 D		Type d'échantillon					
		Surfaces brutes				Surfaces usinées	
		entier	soudé bout à bout	soudé par points	riveté	entier	soudé bout à bout
à grain fin	normalisé	36	36	36	36	24	36
	trempé et revenu	22	22	22	22	16	22
à grain moyen, normalisé		22	22	22	22	16	22

Contrôle des mesures des échantillons normalisés

Caractéristiques relevées	Ecart par rapport aux dimensions du dessin (indiquées entre parenthèses) en mm					
	entier		soudage continu		soudage par points	rivetage
	brut	usiné	brut	usiné		
longueur	-0,1 ± -0,2 (300)	-0,1 ± -0,2 (300)	-0,2 ± -0,4 (300)	-0,1 ± -0,4 (300)	-0,3 ± -0,1 (300)	+0,3 ± +0,6 (300)
largeur	+0,1 ± +0,2 (70)	-0,1 ± -0,3 (70)	-0,05 ± +0,15 (70)	-0,05 ± +0,05 (70)	-0,2 ± +0,1 (60)	-0,2 ± +0,1 (80)
épaisseur	+0,1 ± +0,2 (8)	-0,2 ± +0,2 (7)	+0,1 ± +0,2 (8)	+0,05 ± +0,10 (7)	+0,2 ± +0,4 (16)	+0,2 ± +0,4 (16)
largeur de la section étroite	+0,1 ± +0,2 (35)	+0,1 ± +0,2 (35)	+0,05 ± +0,10 (35)	-0,05 ± +0,05 (35)	-	-
rayon du raccord	+0,5 ± +1,0 (113)	+0,5 ± +1,0 (113)	+0,5 ± +0,8 (113)	+0,5 ± +1 (113)	-	-
interaxe de soudage par points ou rivetage	-	-	-	-	+0,2 ± +0,3 (50)	-0,15 ± -0,05 (50)
diamètre point de soudure on clou du rivet	-	-	-	-	-2 ± -1 (16)	+0,10 ± +0,15 (16,3)
alignement (1)	0,2 ± 0,3	0,1 ± 0,2	0,4 ± 0,6	0,1 ± 0,2	0,2 ± 0,4	0,2 ± 0,5
gauchissement (2)	5' ± 8'	4' ± 7'	5' ± 8'	4' ± 8'	7' ± 10'	8' ± 11'
rugosité des bords (3)	1,8 ± 2,4 (3,0)	1,4 ± 2,0 (3,0)	1,6 ± 2,8 (3,0)	1,2 ± 1,8 (3,0)	2,5 ± 3,5 (3,0)	2,5 ± 3,5 (3,0)
rugosité des faces (3)	2 ± 4 (~)	1,2 ± 1,8 (3,0)	2 ± 4 (~)	2,0 ± 2,8 (3,0)	2 ± 4 (~)	2 ± 4 (~)

- (1) déviation par rapport à une droite de l'axe longitudinal de l'échantillon, mesurée dans le plan normal aux faces
- (2) angle entre les deux extrémités de l'échantillon, mesuré dans le plan normal à l'axe longitudinal et exprimé en minutes
- (3) rugosité Ra exprimée en um

Contrôle des mesures des échantillons trempés et revenus

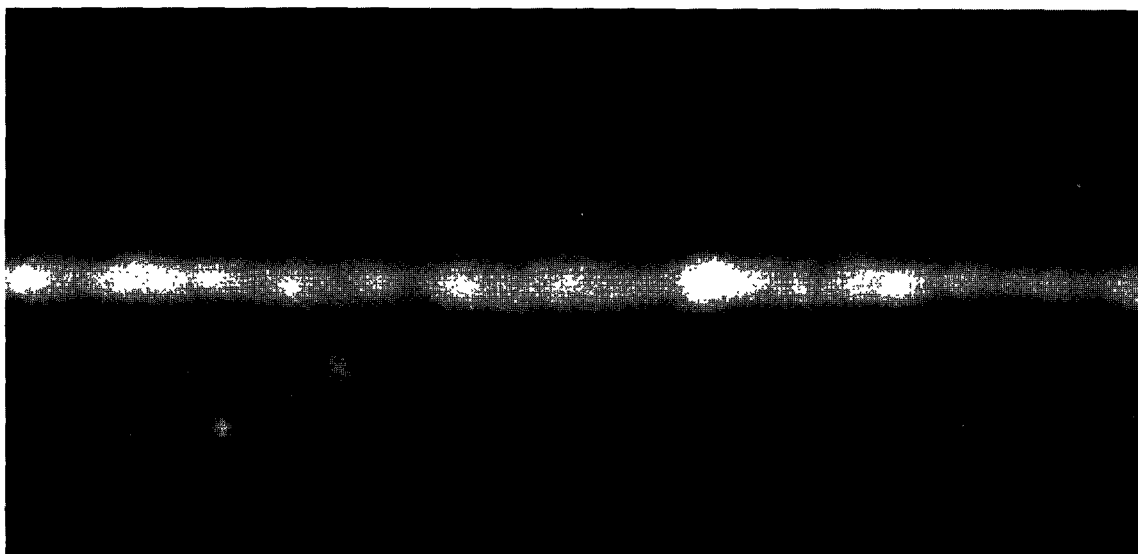
Caractéristiques relevées	Ecart par rapport aux dimensions du dessin (indiquées entre parenthèses) in mm					
	entier		soudage continu		soudage par points	rivetage
	brut	usiné	brut	usiné		
longueur	-0,2 ± +0,1 (300)	-0,2 ± +0,1 (300)	+0,3 ± +0,4 (300)	-0,1 ± +0,1 (300)	+0,5 ± +0,8 (300)	+0,6 ± +1,0 (300)
largeur	-0,3 ± -0,2 (70)	-0,2 ± +0,1 (70)	-0,2 ± +0,1 (70)	-0,1 ± +0,1 (70)	-0,4 ± +0,2 (60)	-0,5 ± +0,3 (60)
épaisseur	+0,1 ± +0,3 (8)	-0,3 ± -0,2 (7)	+0,1 ± +0,3 (8)	-0,2 ± -0,1 (7)	+0,3 ± +0,6 (16)	+0,1 ± +0,4 (16)
largeur de la section étroite	-0,2 ± +0,2 (35)	-0,3 ± -0,1 (35)	-0,2 ± -0,1 (35)	0 ± +0,1 (35)	-	-
rayon du raccord	+0,5 ± +1,0 (113)	+0,5 ± +1,0 (113)	+0,5 ± +1,0 (113)	+0,5 ± +1,0 (113)	-	-
interaxe de soudage par points ou rivetage	-	-	-	-	+0,4 ± +0,8 (50)	-0,2 ± -0,1 (50)
diamètre point de soudure ou clou du rivet	-	-	-	-	-1,0 ± +1,0 (16)	+0,1 ± +0,2 (16,3)
alignement (1)	0,2 ± 0,5	0,2 ± 0,5	0,2 ± 0,5	0,1 ± 0,5	0,3 ± 1,0	0,6 ± 1,0
gauchissement (2)	5' ± 15'	3' ± 8'	5' ± 9'	2' ± 6'	4' ± 12'	5' ± 10'
rugosité des bords (3)	1,0 ± 1,8 (3)	1,0 ± 1,5 (3)	1,2 ± 1,6 (3)	1,2 ± 1,4 (3)	3,0 ± 5,0 (3)	3,0 ± 5,0 (3)
rugosité des faces (3)	3,0 ± 4,0 (~)	1,0 ± 1,5 (3)	3,0 ± 4,0 (~)	1,2 ± 1,8 (3)	2,5 ± 4,5 (~)	2,5 ± 4 (~)

(1) déviation par rapport à une droite de l'axe longitudinal de l'échantillon, mesurée dans le plan normal aux faces

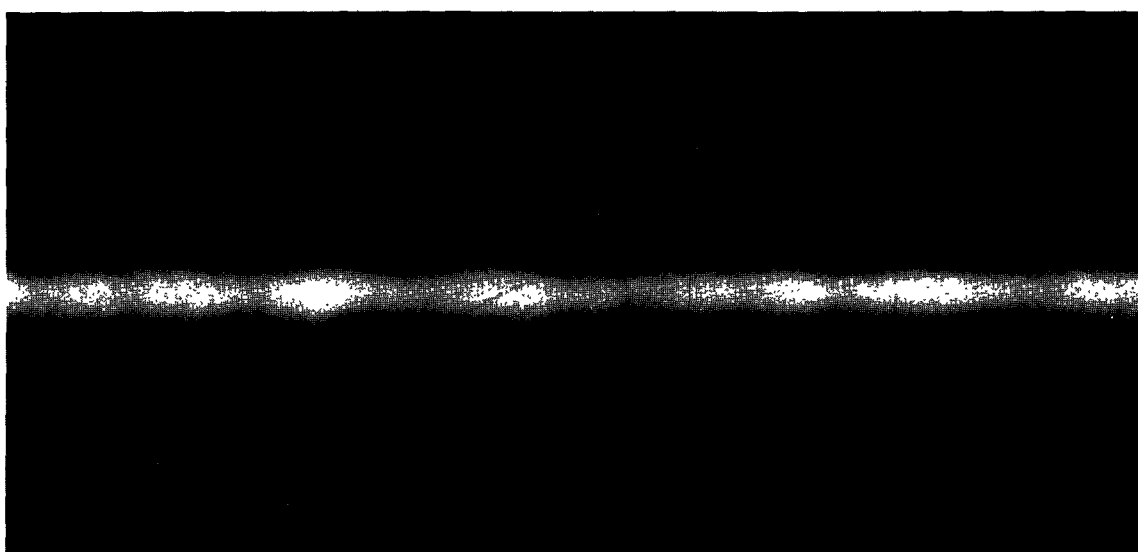
(2) angle entre les deux extrémités de l'échantillon, mesuré dans le plan normal à l'axe longitudinal et exprimé en minutes

(3) rugosité Ra exprimée en  $\mu m$

## Annexe 18



Examen radiographique des tôles soudées bout à bout



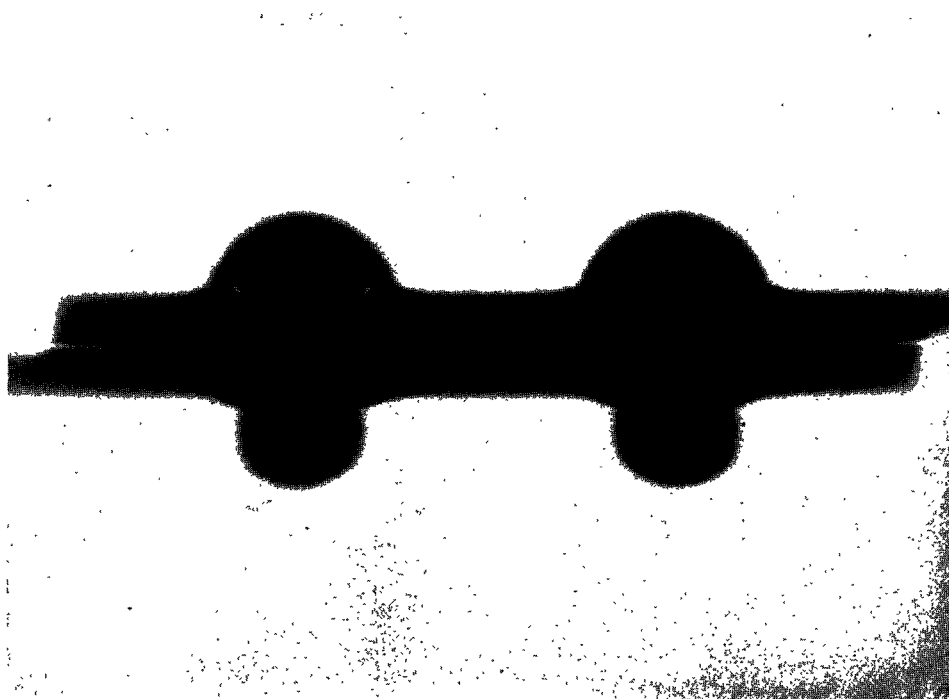
## Annexe 19



Examen radiographique d'un échantillon soudé par points

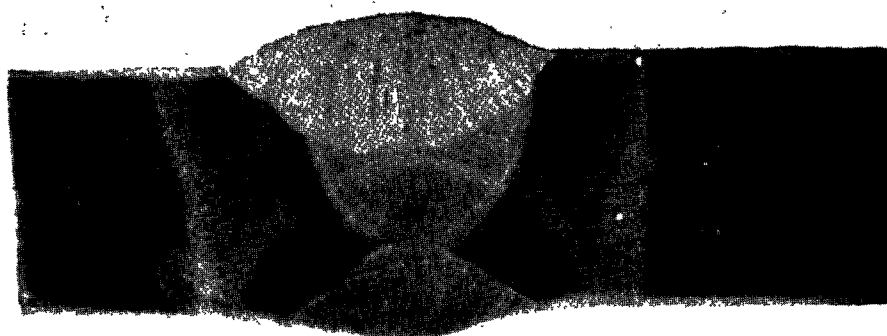


## Annexe 20



Examen radiographique d'un échantillon riveté

## Annexe 21



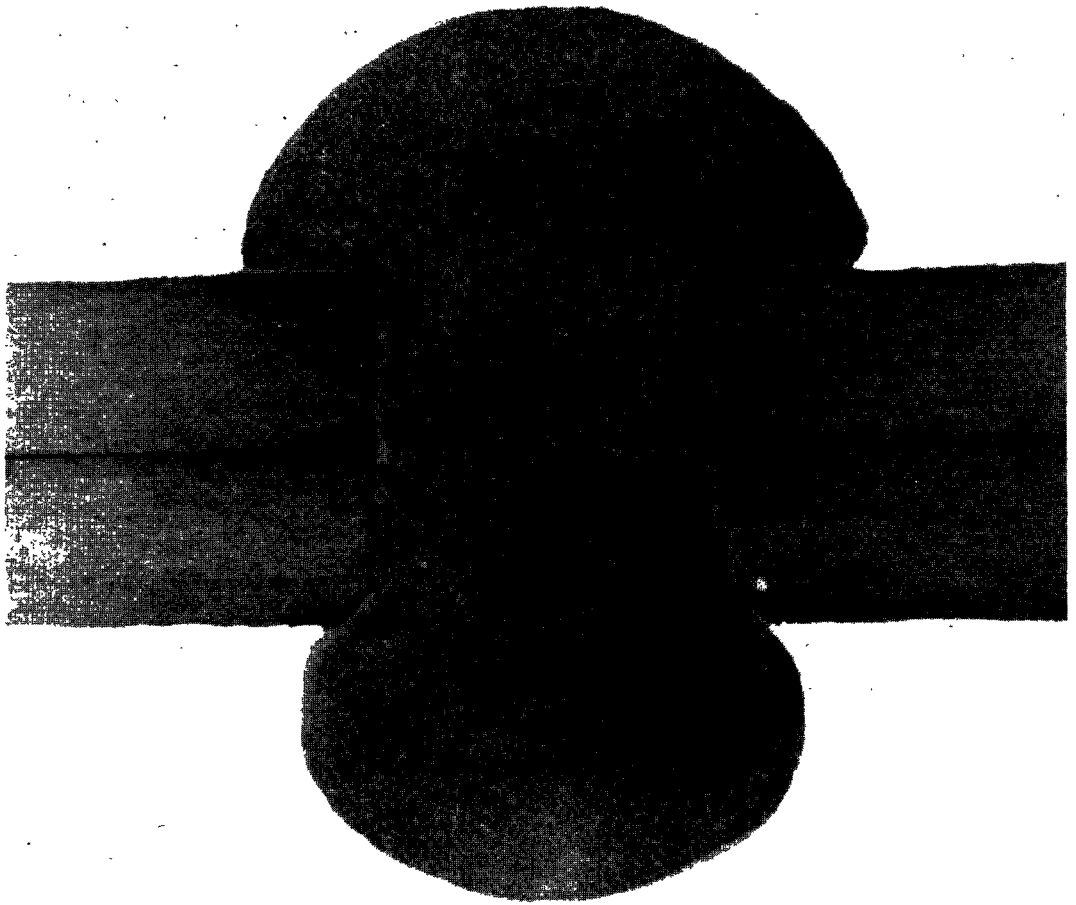
Examen macrographique d'un échantillon soudé  
bout à bout

## Annexe 22

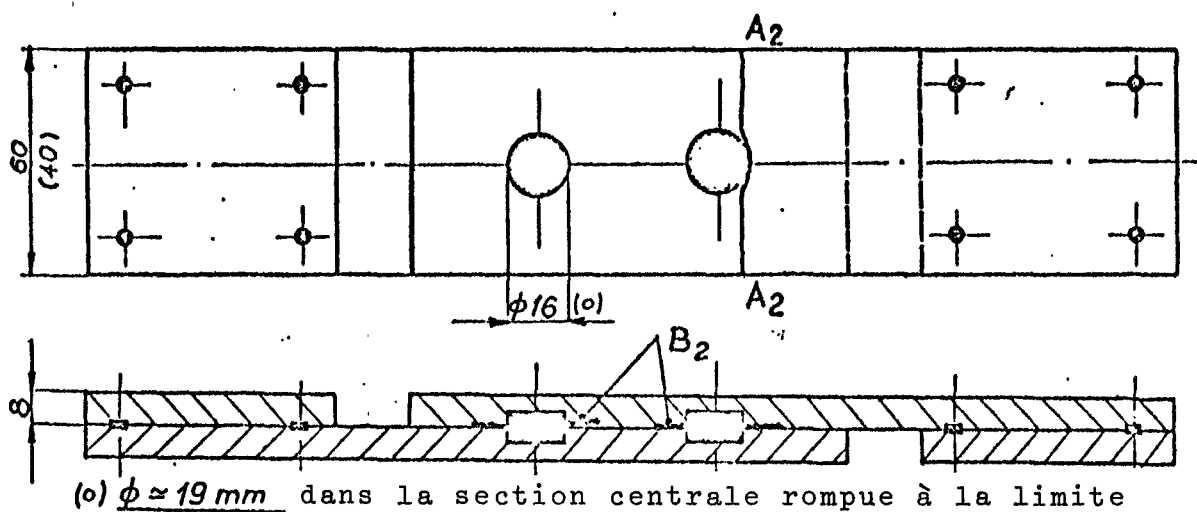
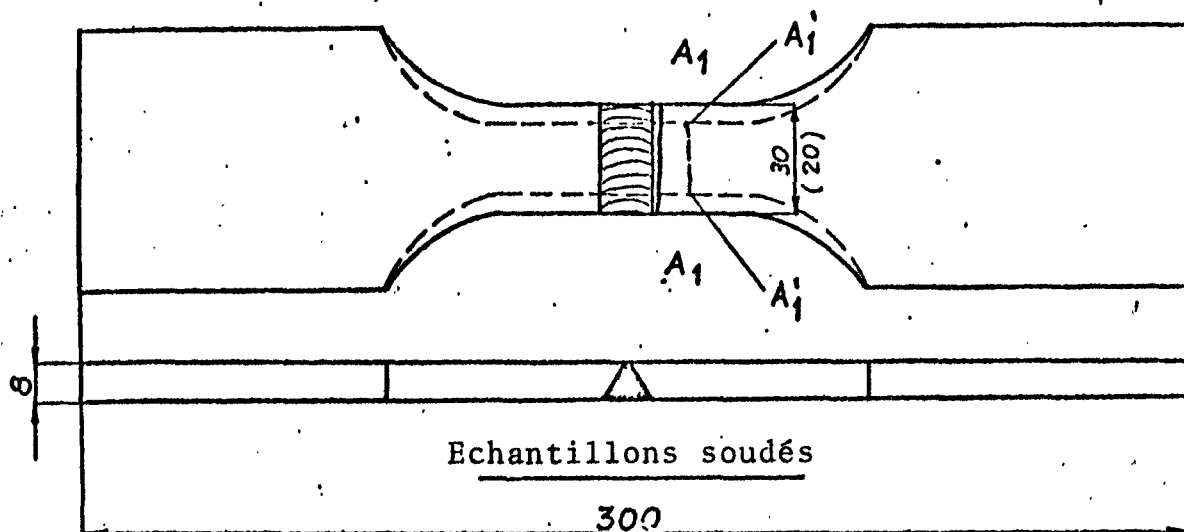


Examen macrographique d'un échantillon soudé par points

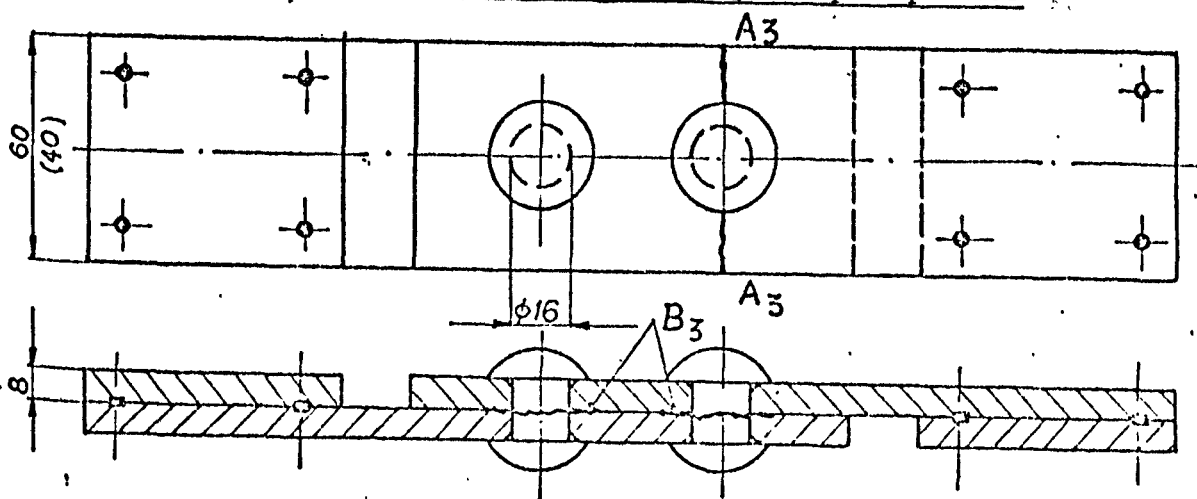
Annexe 23



Examen macrographique d'un échantillon riveté



Echantillons soudés par points



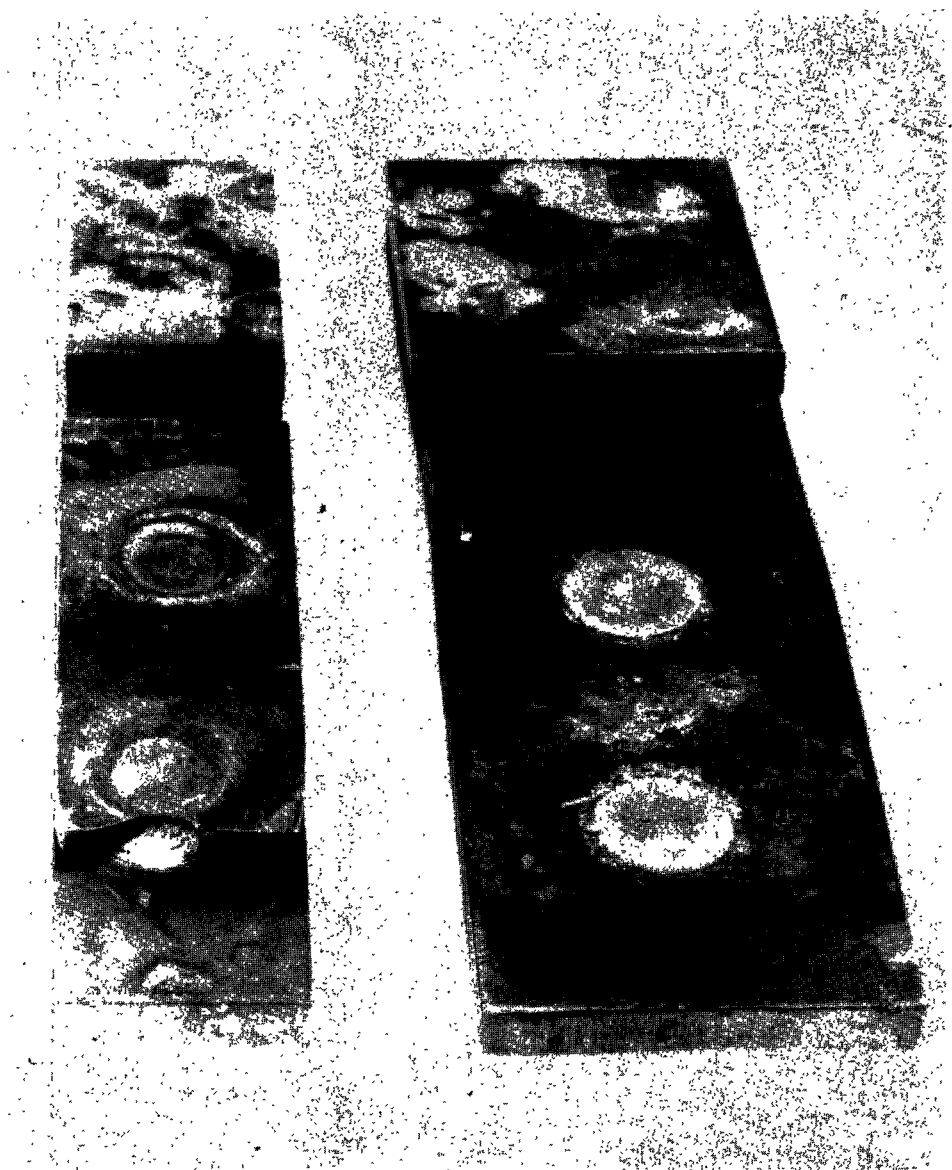
Echantillons rivetés

Résistance du matériel de base

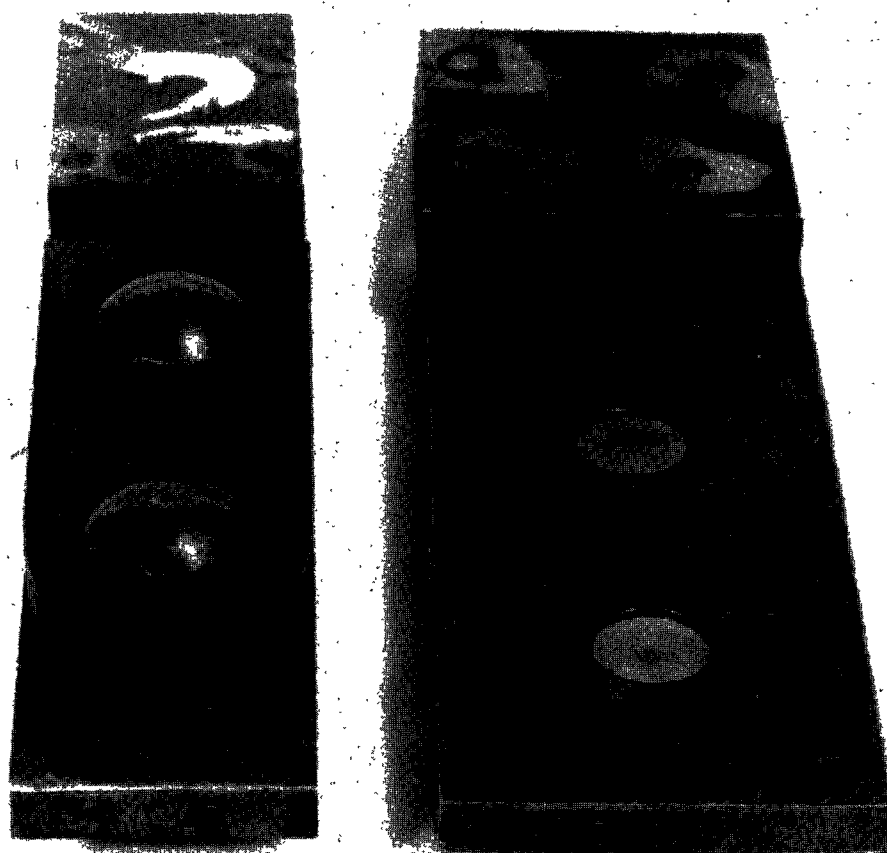
{ normalisé  
amélioré

$R = 61 \pm 63 \text{ Kg/mm}^2$  ;  $S_{0,2} = 41 \pm 44 \text{ Kg/mm}^2$  ;  $A_{p5} = 28 \pm 31 \%$   
 $R = 77 \pm 79$  ;  $S_{0,2} = 70 \pm 72$  " ;  $A_{p5} = 18 \pm 21 \%$

matériel	grain	type de joint	charge max à la rupture Kg	caractéristiques de la rupture		sollécitation nominale de rupture Kg/mm <sup>2</sup>	
				endroit	section résistante mm <sup>2</sup>	traction tôle	entaille, point ou rivet
normalisé	moyen	soudage continu (surfaces brutes)	14.900	A <sub>1</sub>	30 x 8	62	-
		soudage par points	26.500	A <sub>2</sub>	60 x 8	55	-
			27.700	B <sub>2</sub>	2 x 200	-	49
			20.400	A <sub>2</sub>	40 x 8	63	-
		rivetage	16.300	B <sub>3</sub>	2 x 200	-	41
			15.700	B <sub>3</sub>	2 x 200	-	39
			12.700	A <sub>3</sub>	(40-16) x 8	66	-
	fin	soudage continu (surfaces brutes)	14.700	A <sub>1</sub>	30 x 8	61	-
		soudage par points	27.500	A <sub>2</sub>	60 x 8	58	-
			24.400	B <sub>2</sub>	2 x 200	-	44
			19.300	A <sub>2</sub>	40 x 8	60	-
		rivetage	15.200	B <sub>3</sub>	2 x 200	-	40
			16.100	B <sub>3</sub>	2 x 200	-	40
			11.600	A <sub>3</sub>	(40-16) x 8	60	-
trempé et revenu	fin	soudage continu (surfaces brutes)	12.300 12.600	A <sub>1</sub>	20 x 8	77 79	-
		soudage par points	30.200 19.900	A <sub>2</sub> A <sub>2</sub>	60 x 8 40 x 8	63 62	-
		rivetage	15.400 15.000	B <sub>3</sub> A <sub>3</sub>	2 x 200 (40-16) x 8	- 78	38 -



Fracture statique d'échantillons soudés par points

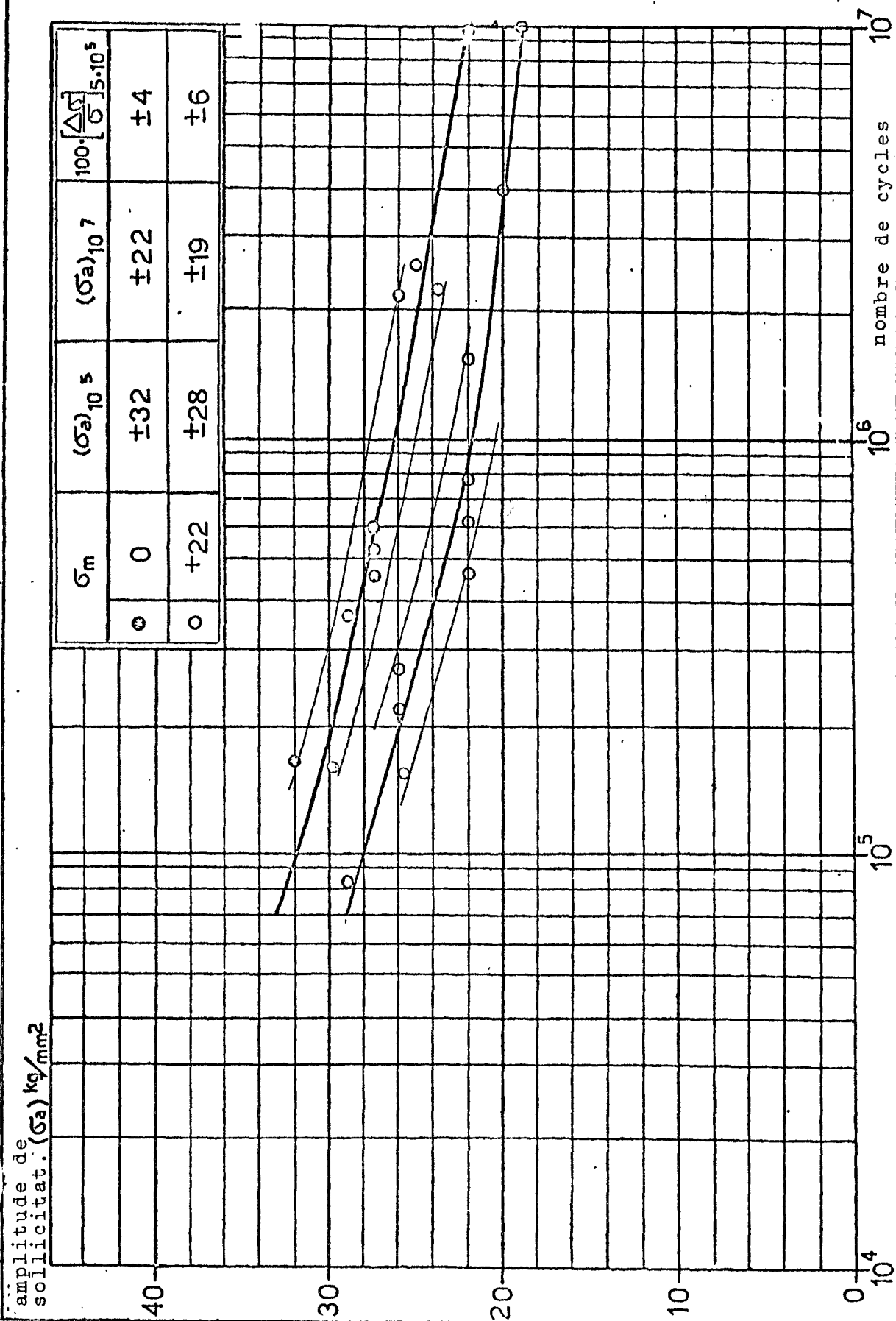


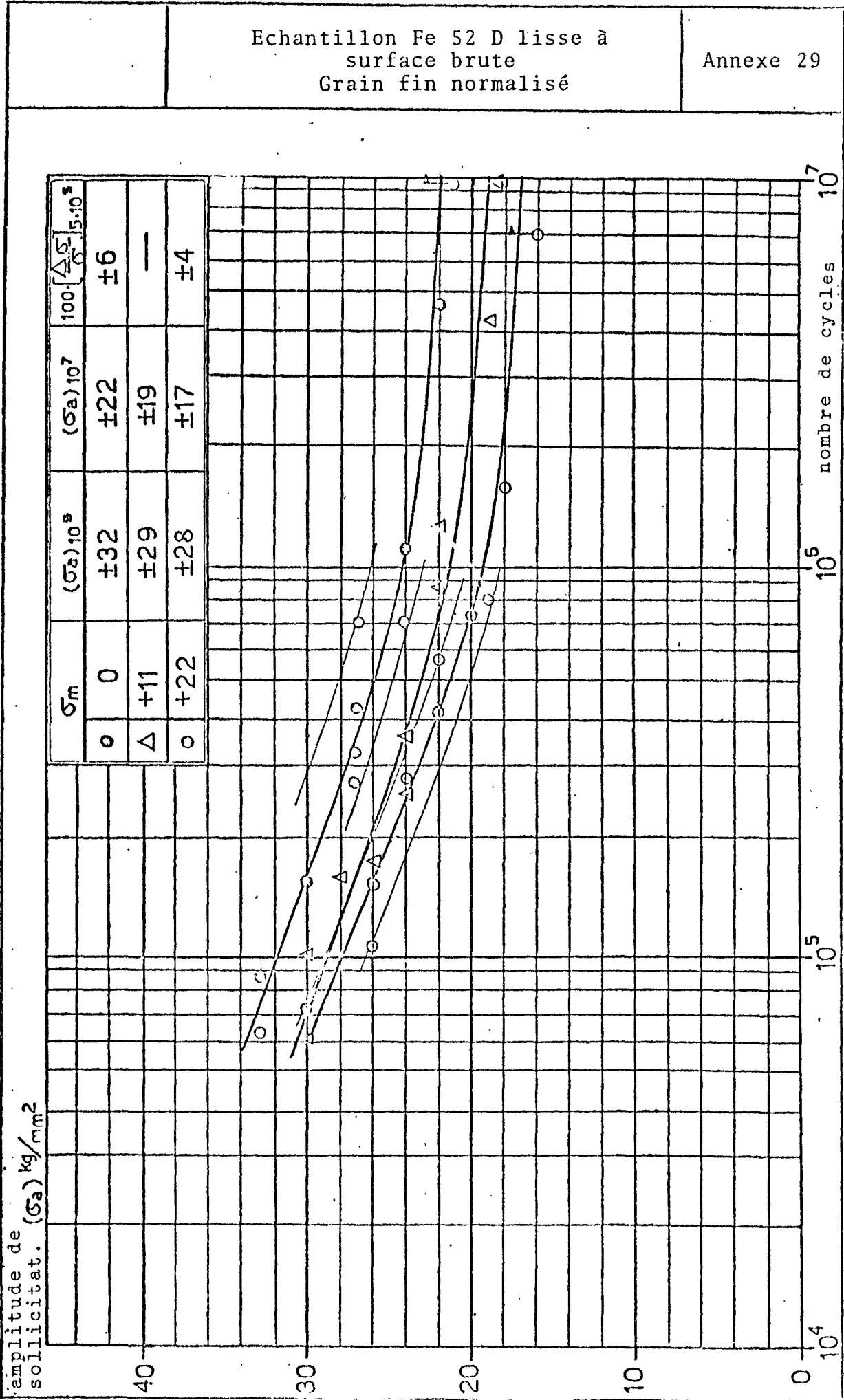
Fracture statique d'échantillons rivetés



Echantillon Fe 52 D lisse à  
surface brute  
Grain moyen normalisé

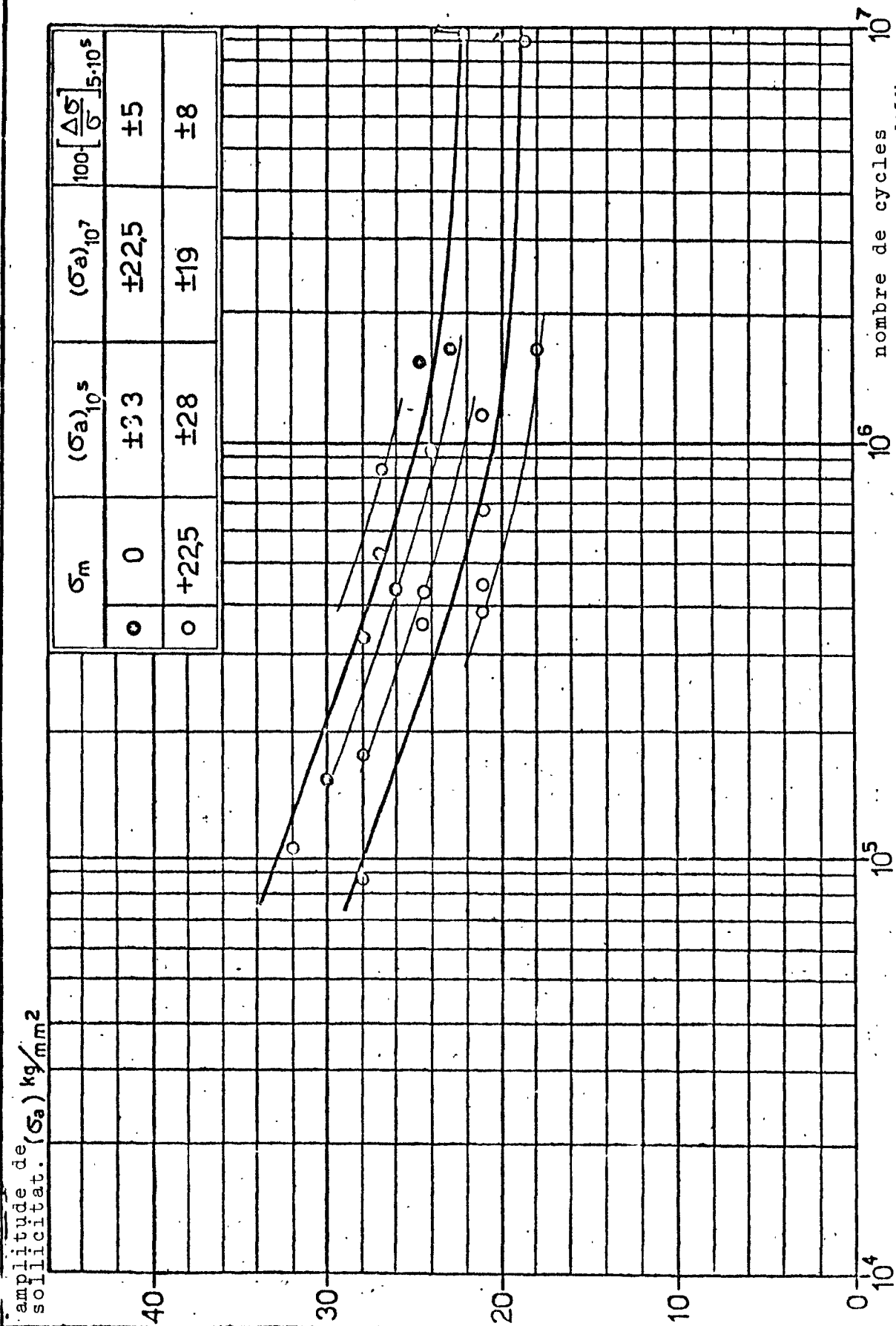
Annexe 28





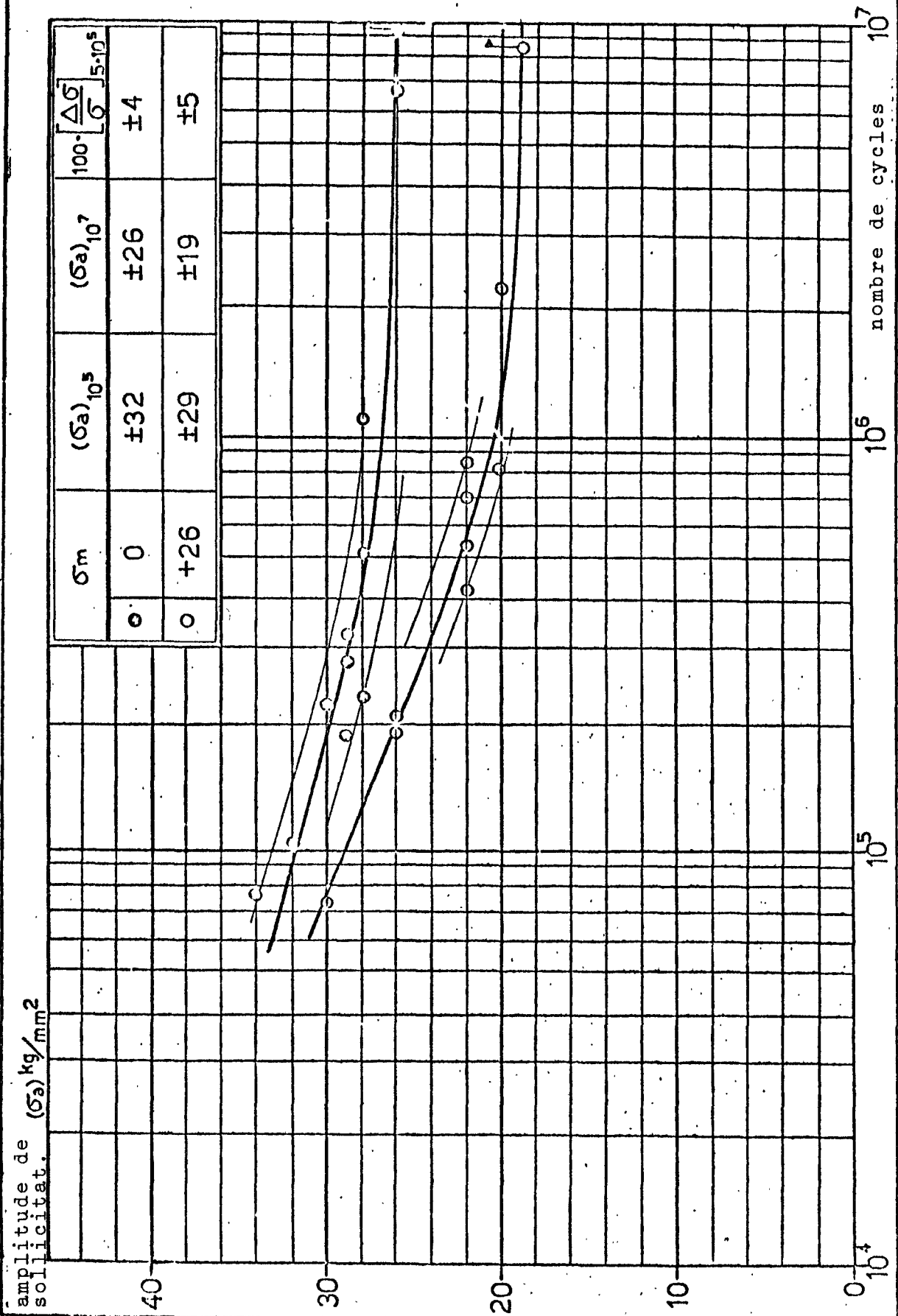
Echantillon Fe 52 D lisse à  
surface brute  
Grain fin, trempé et revenu

Annexe 30



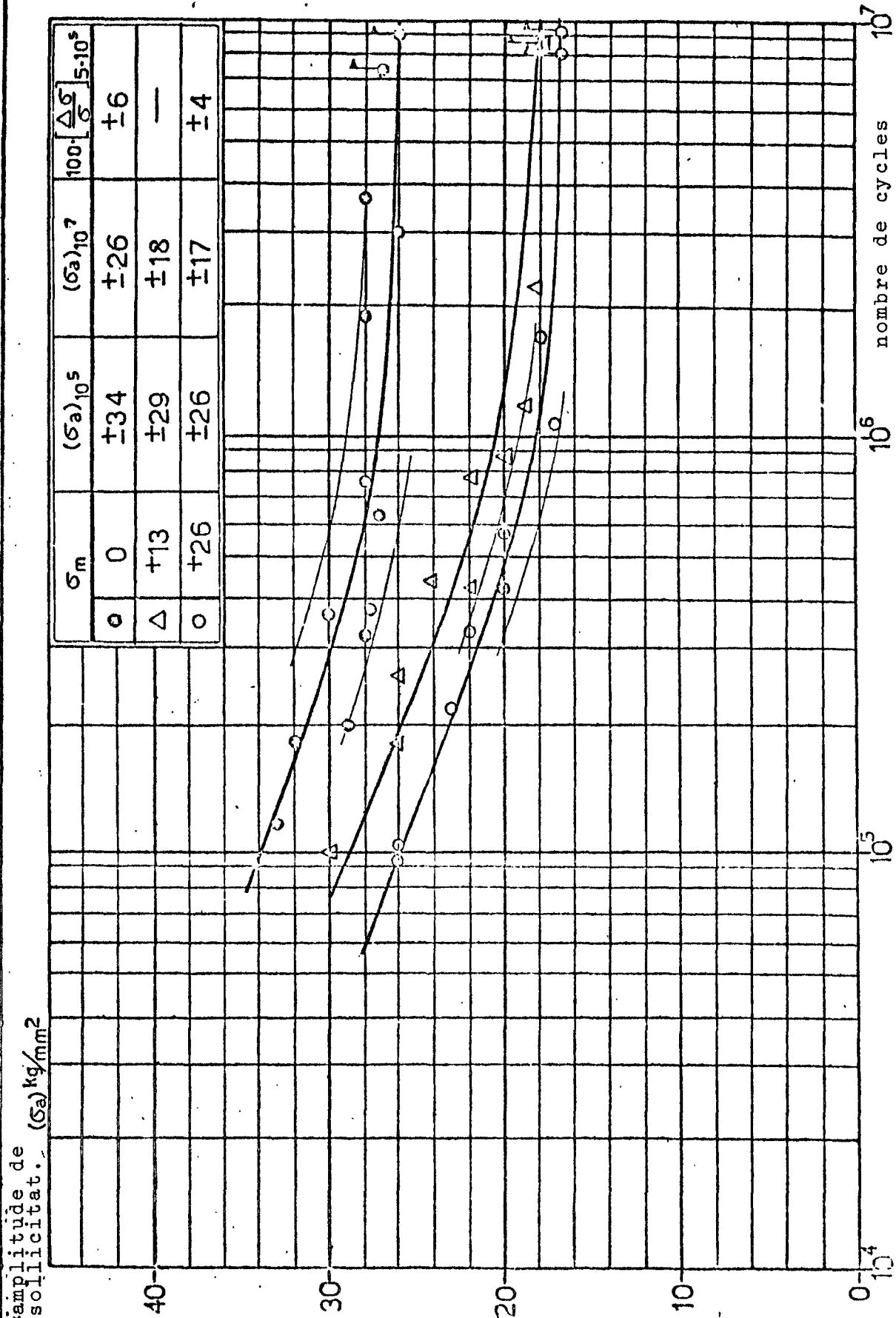
Echantillon Fe 52 D lisse à  
surface usinée  
Grain moyen normalisé

Annexe 31



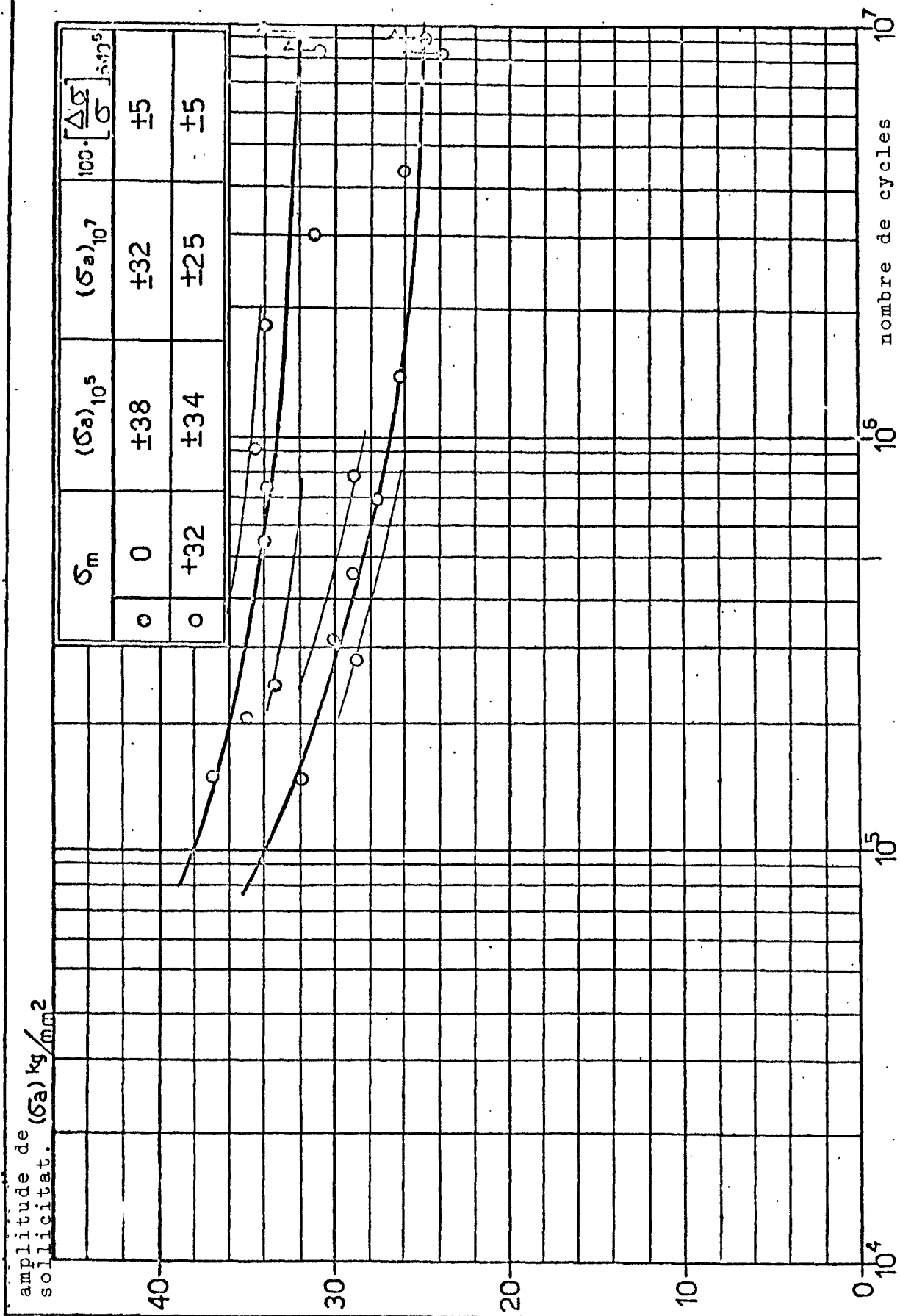
Echantillon Fe 52 D lisse à  
surface usinée  
Grain fin normalisé

Annexe 32



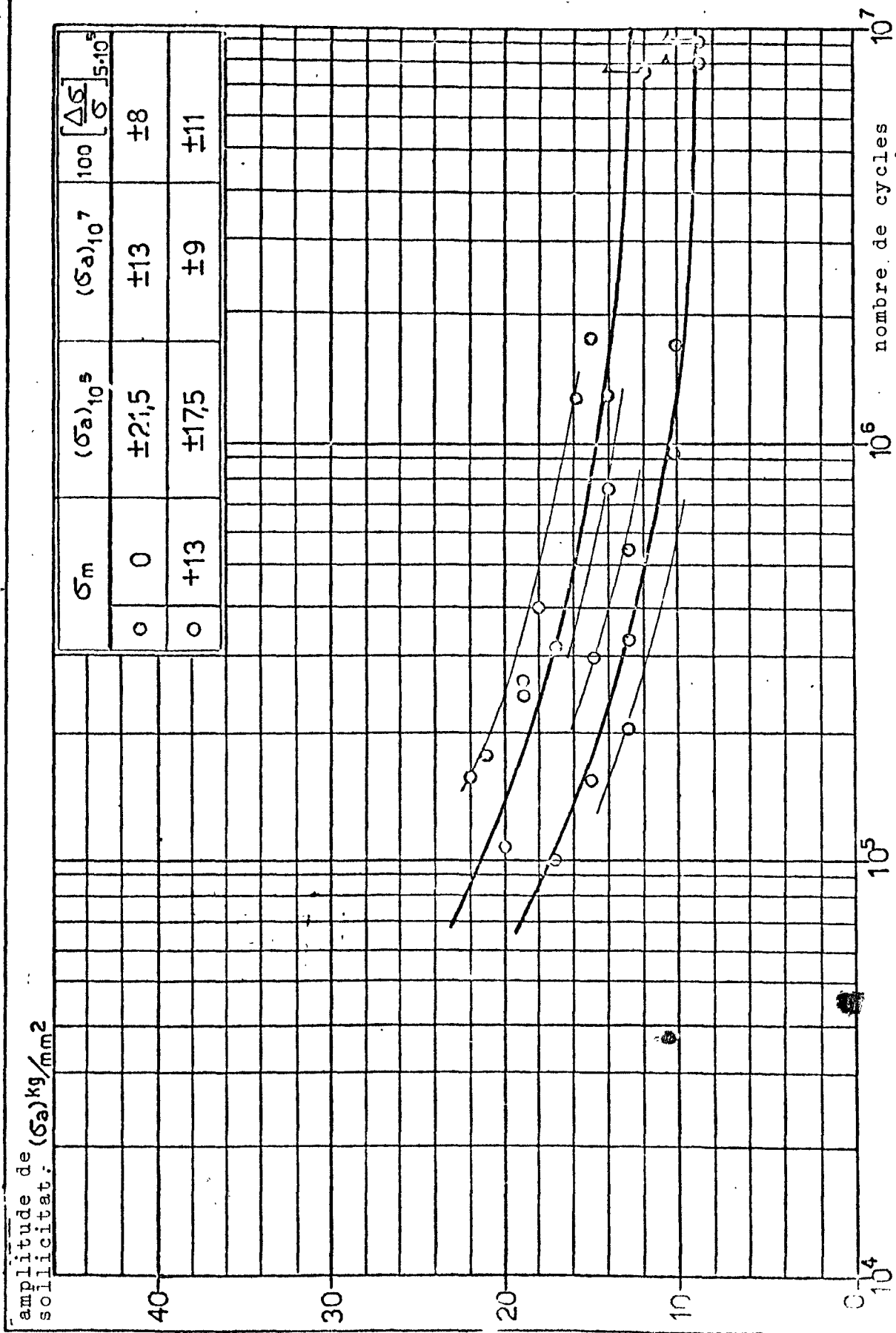
Echantillon Fe 52 D lisse à  
surface usinée  
Grain fin, trempé et revenu

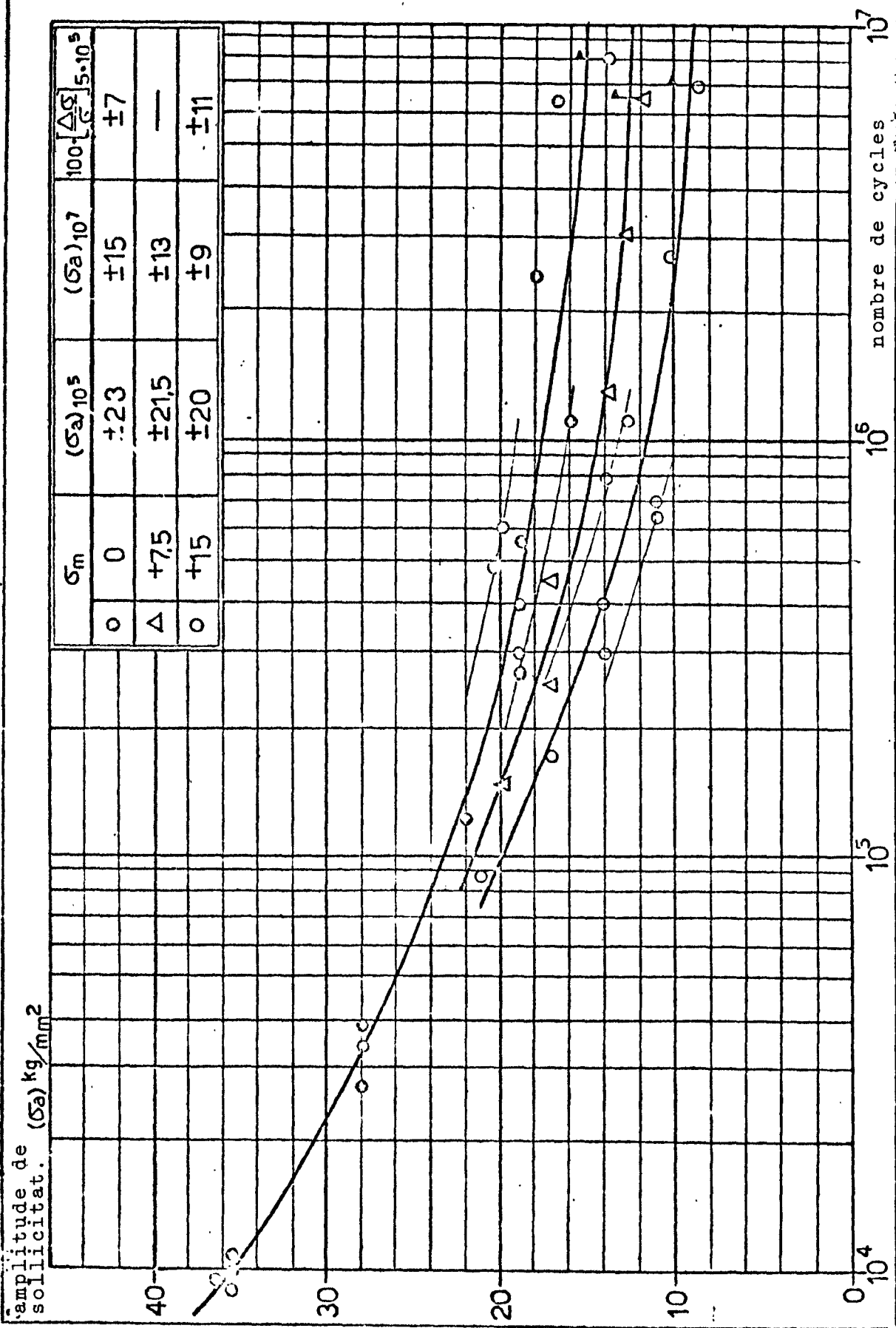
Annexe 33



Echantillon Fe 52 D soudé  
bout à bout à surface brute  
Grain moyen normalisé

Annexe 34

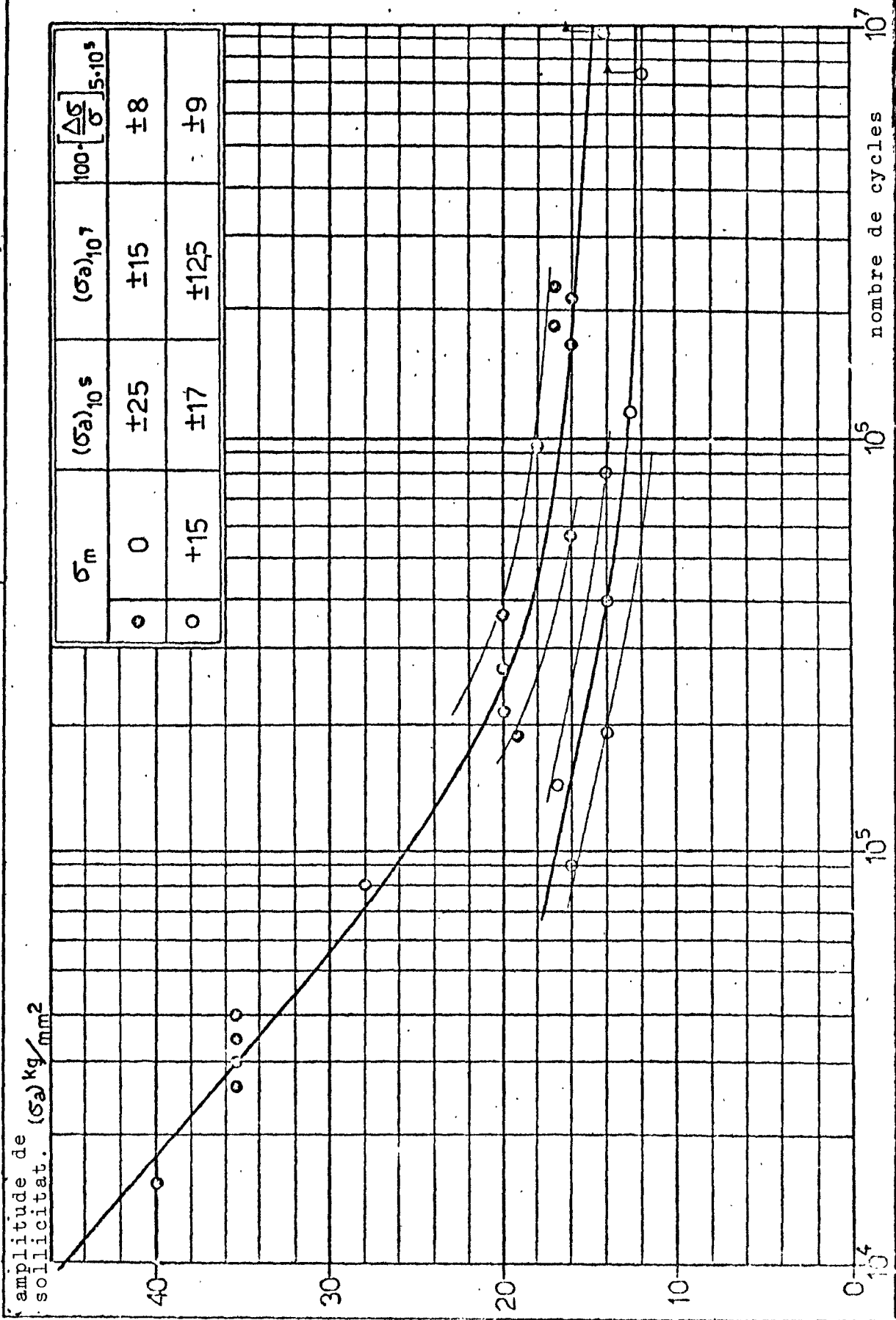


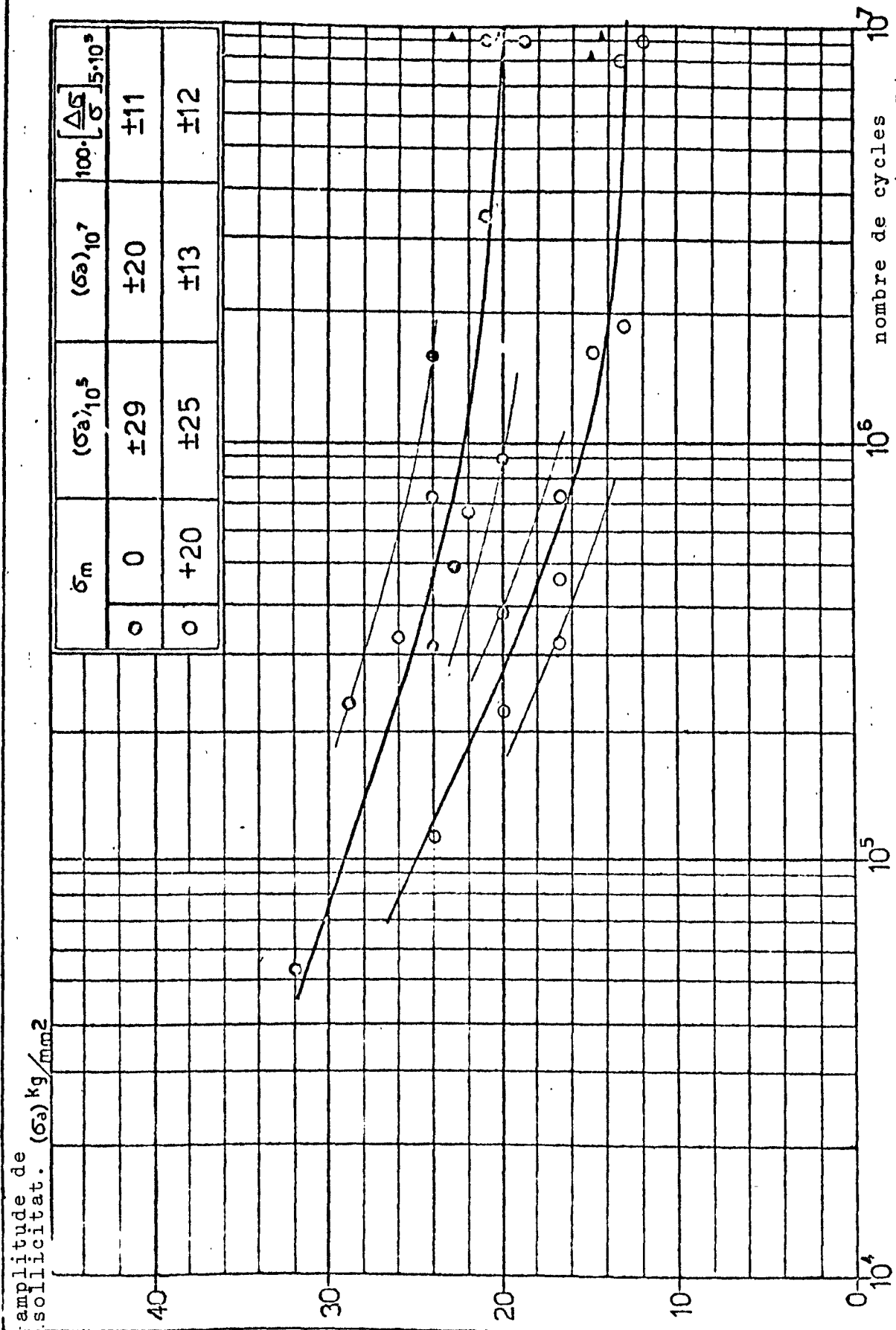




Echantillon Fe 52 D soudé  
bout à bout à surface brute  
Grain fin, trempé et revenu

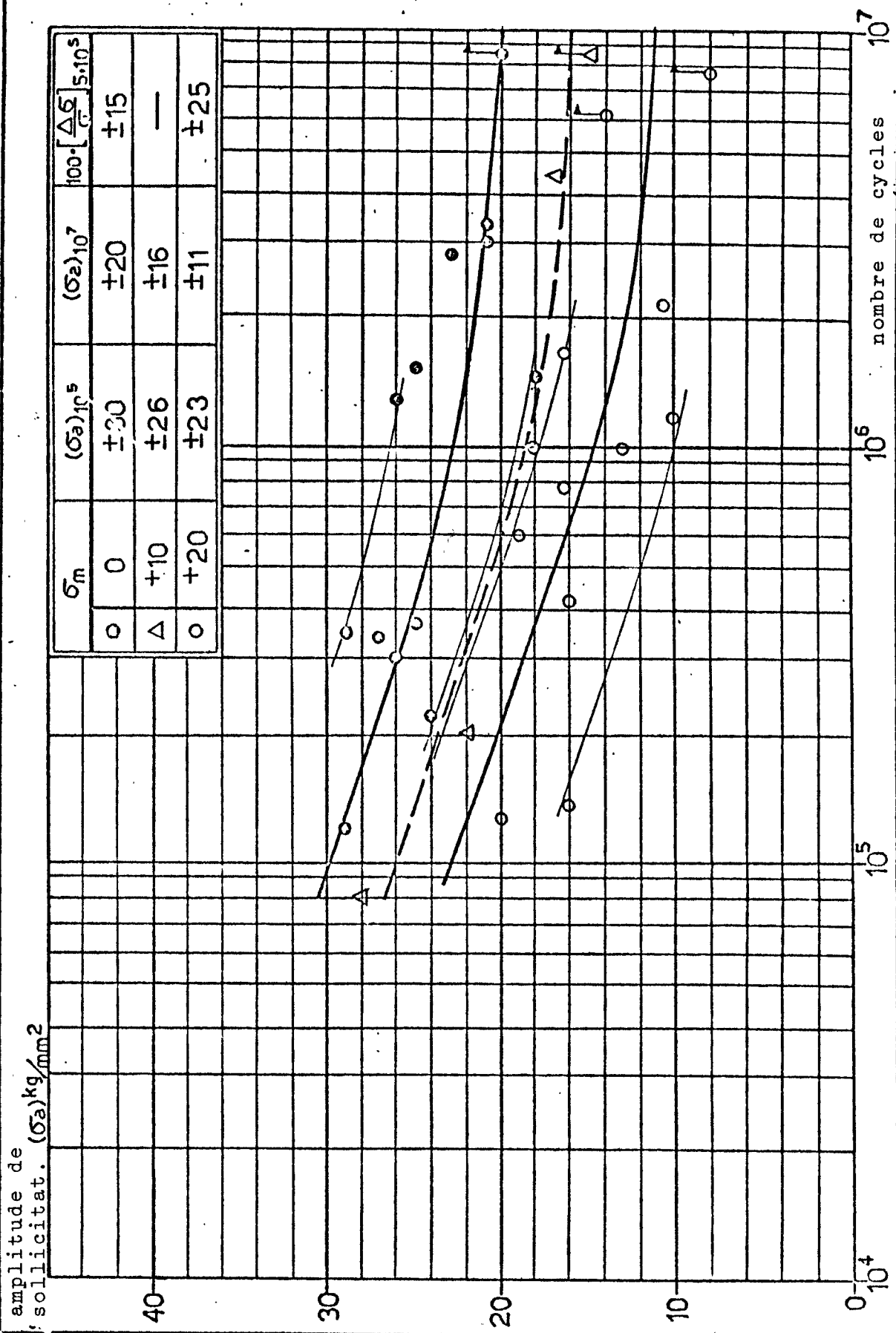
Annexe 36





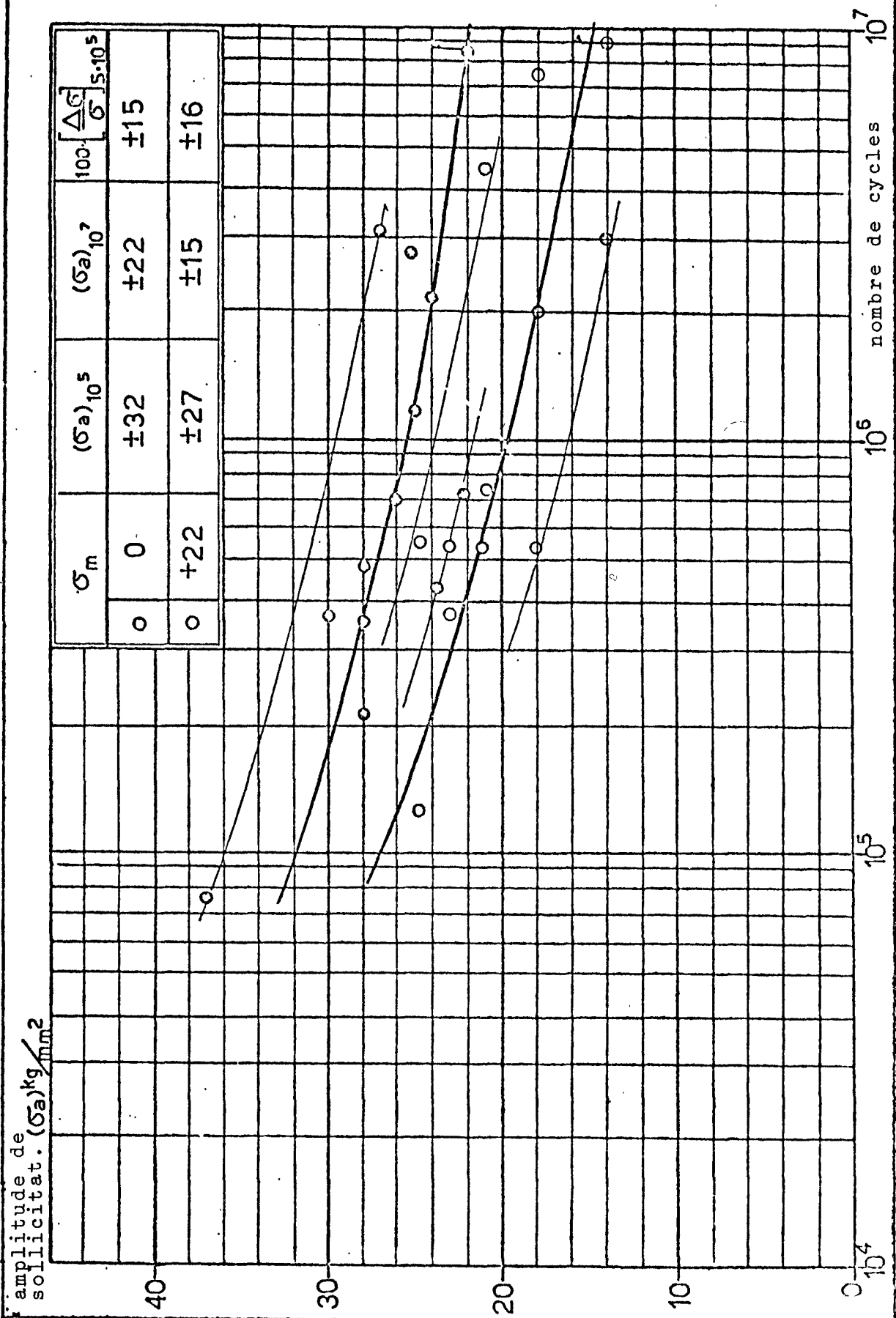
Echantillon Fe 52 D soudé  
bout à bout à surface usinée  
Grain fin normalisé

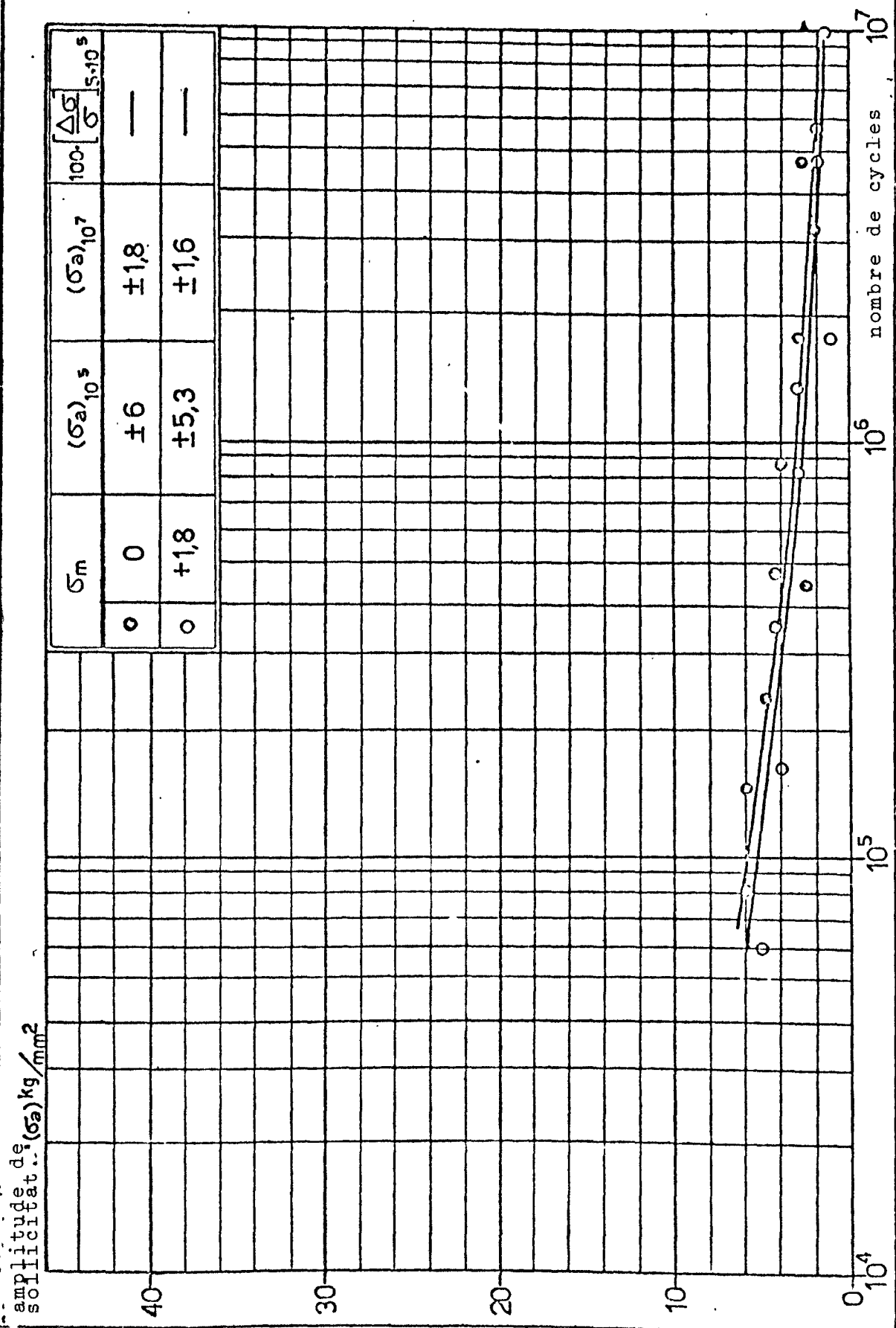
Annexe 38



Echantillon Fe 52 D soudé  
bout à bout à surface usinée  
Grain fin, trempé et revenu

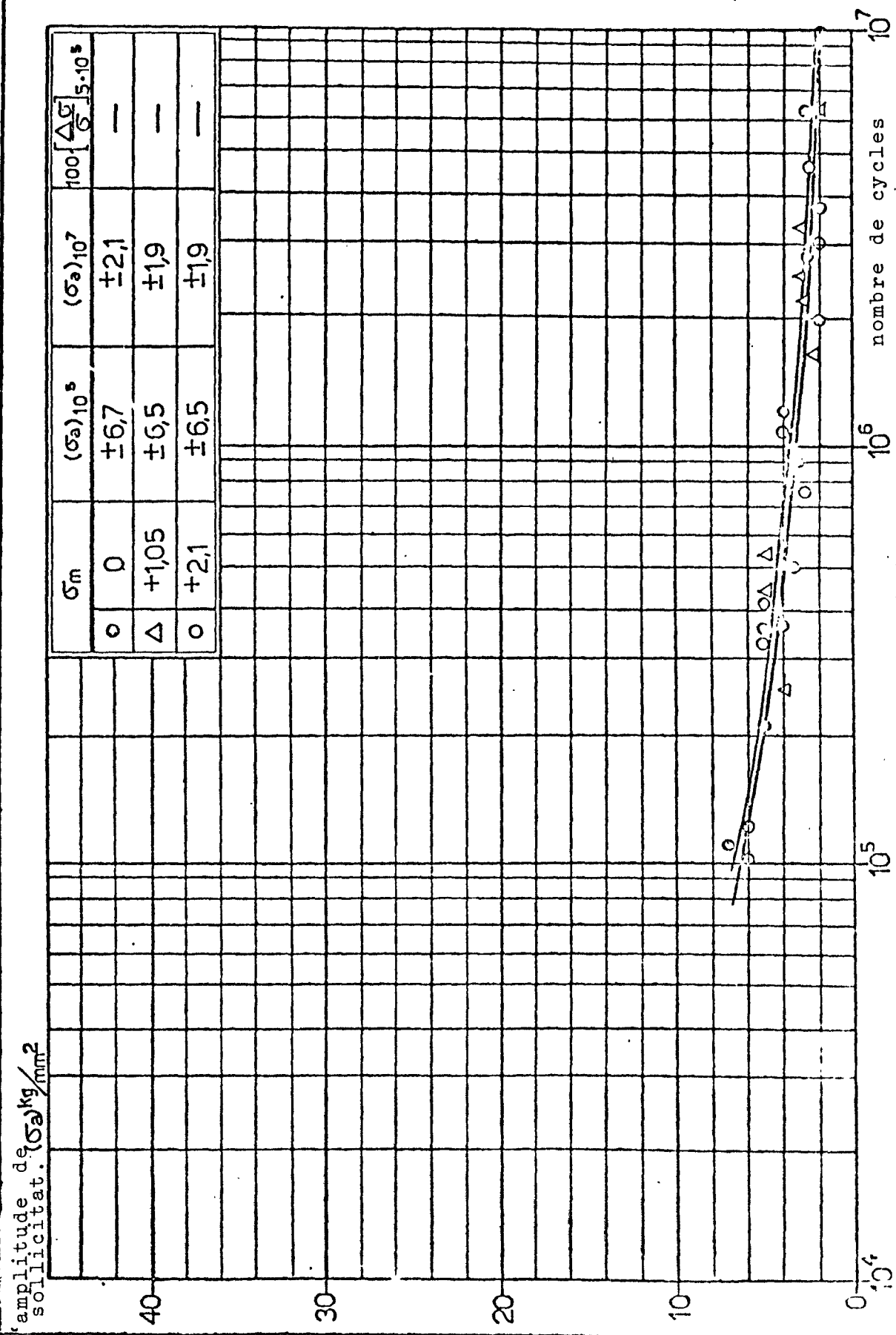
Annexe 39





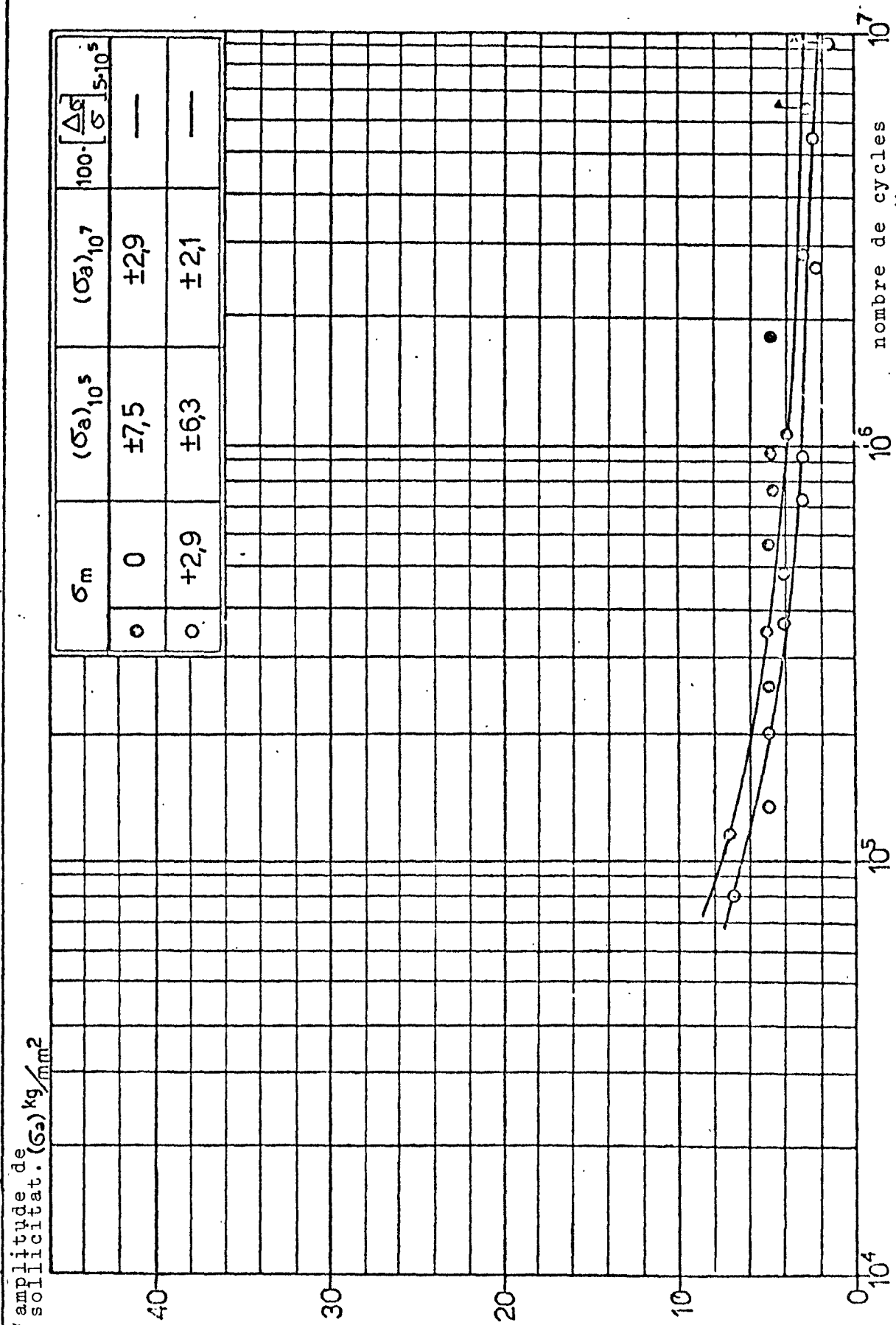
Echantillon Fe 52 D soudé  
par points  
Grain fin normalisé

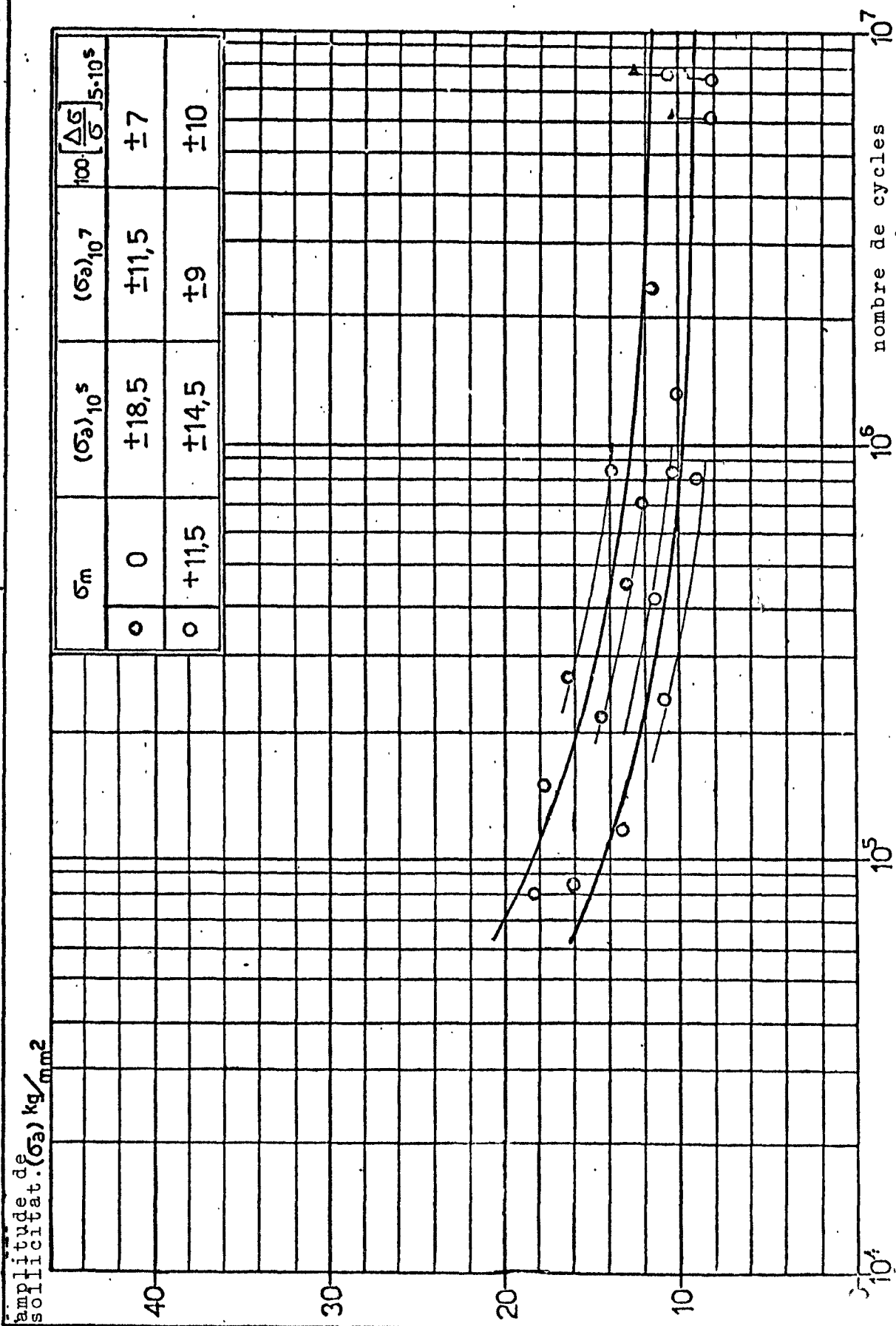
Annexe 41



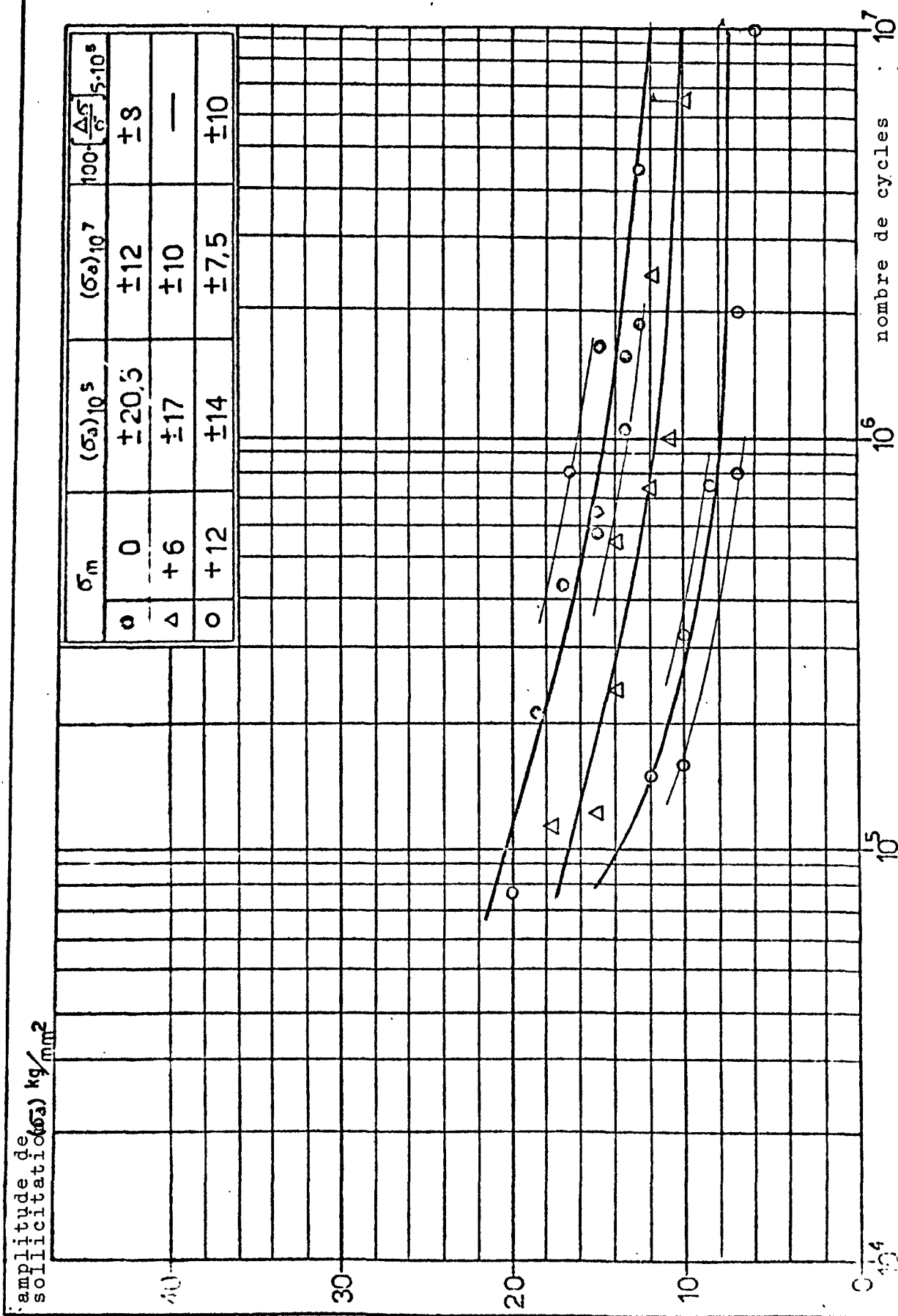
Echantillon Fe 52 D soudé  
par points  
Grain fin, trempé et revenu

Annexe 42



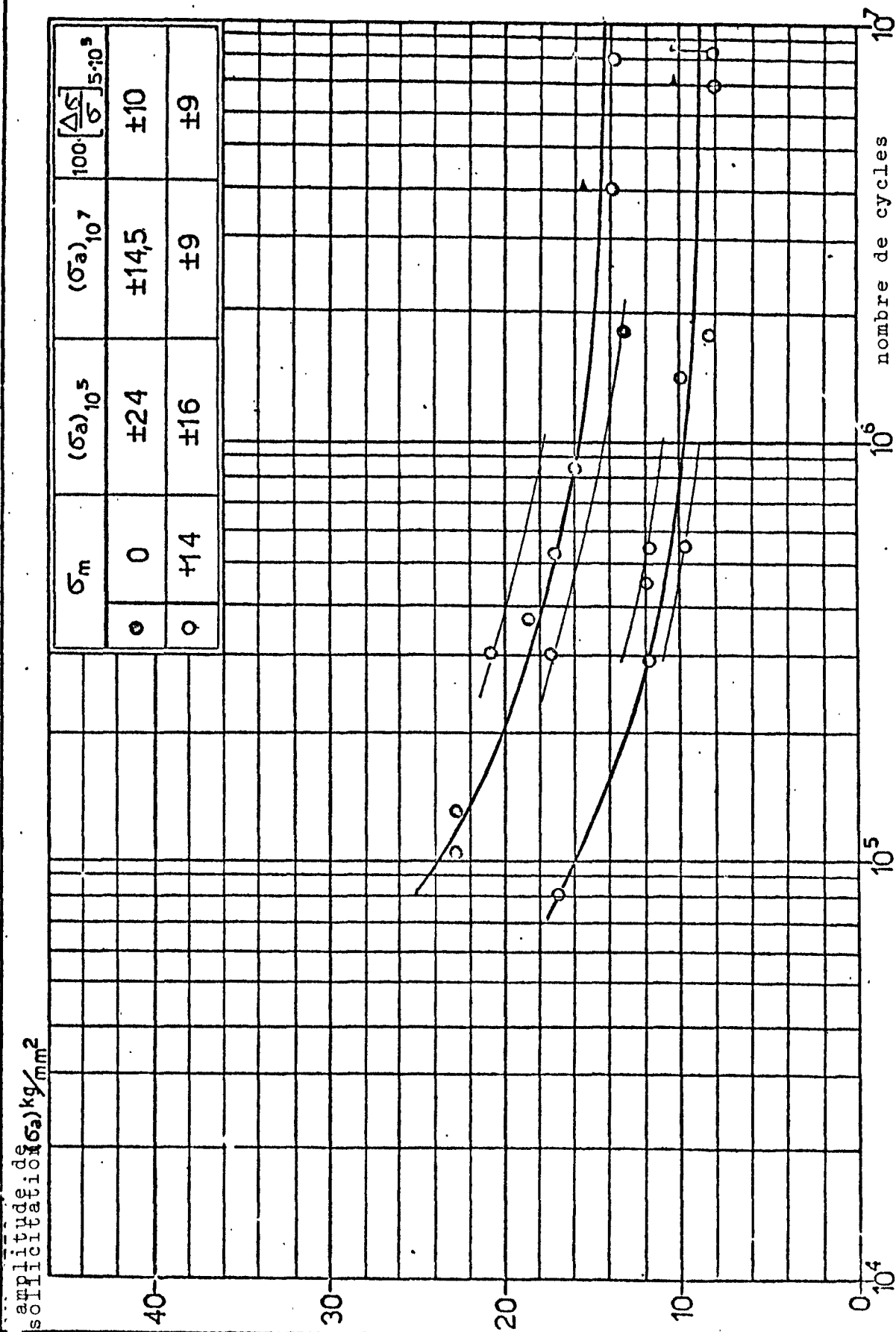






Echantillon Fe 52 D riveté  
Grain fin, trempé et revenu

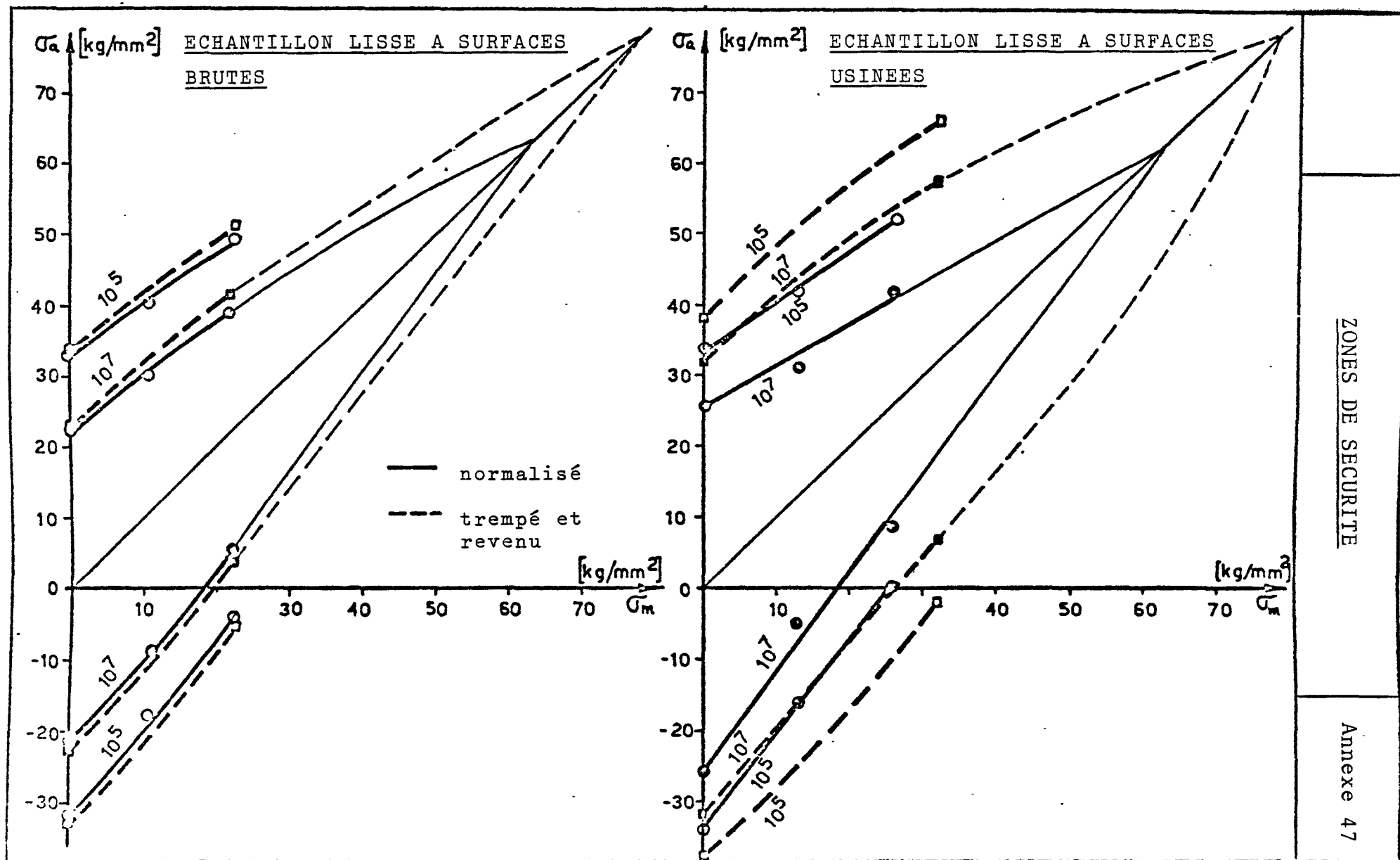
Annexe 45

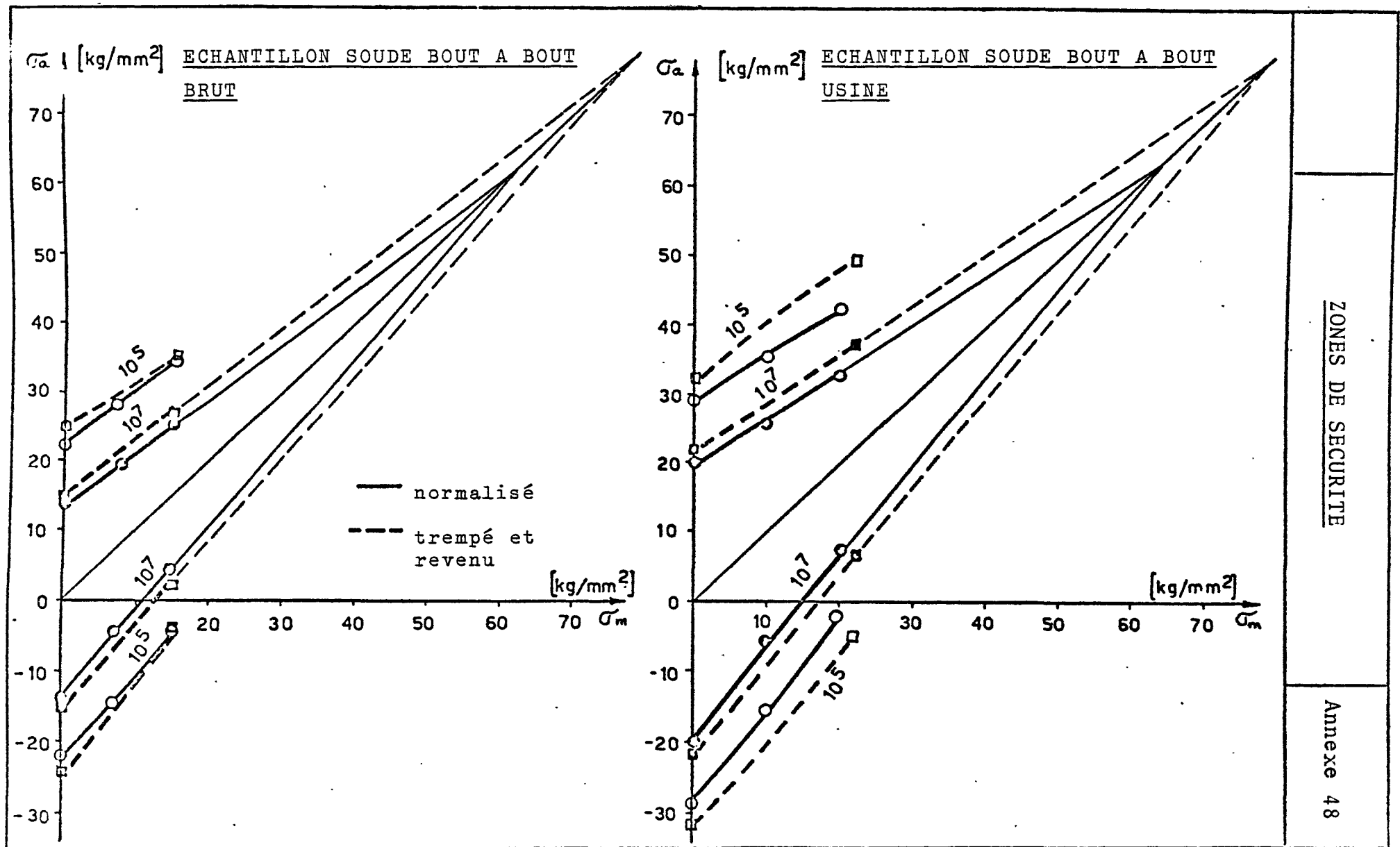


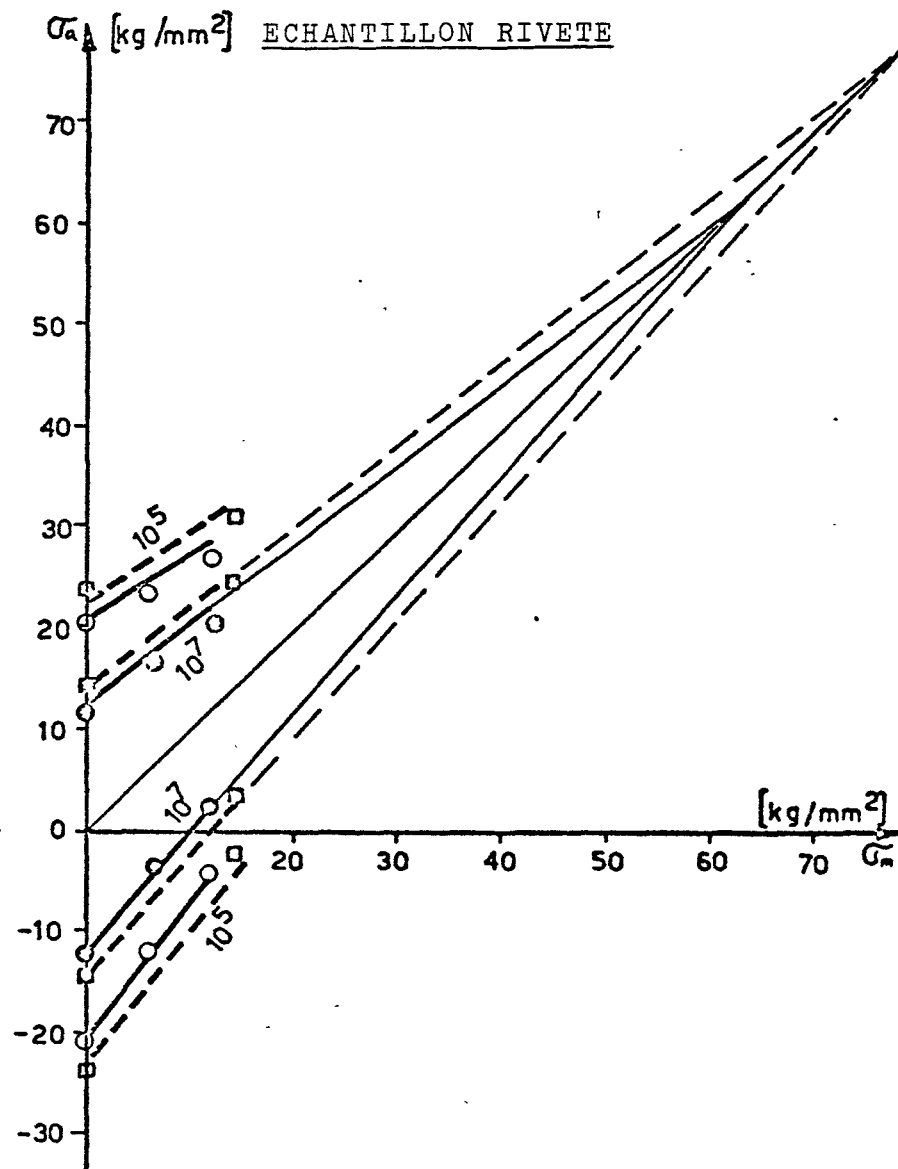
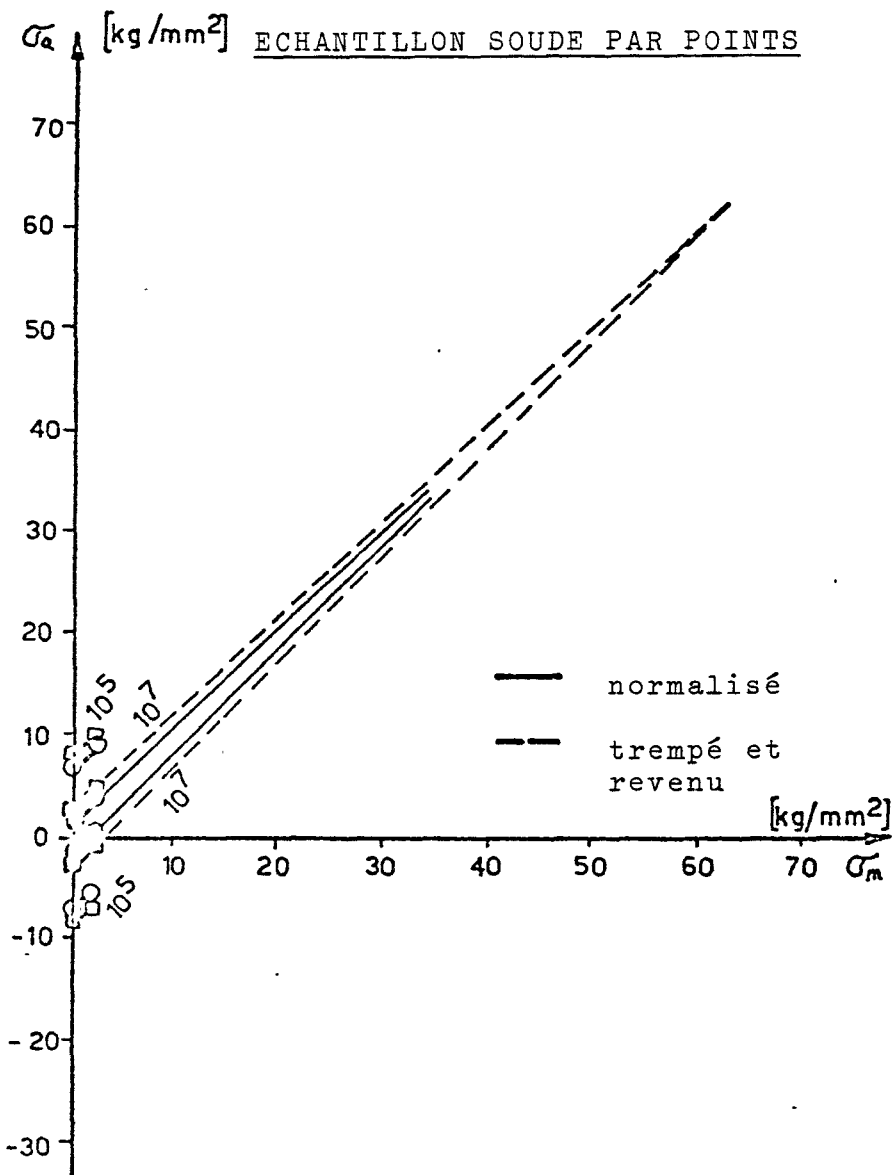
Acier <b>Fe 52D</b>	charge initiale	nombre cycle à rupture	Résistance à la fatigue de l'échantillon (kg/mm <sup>2</sup> )					
			entier		soudé bout à bout		soudé par points	riveté
			brut	usiné	brut	usiné	(solicit. nom.)	
Grain moyen  normalisé	0	10 <sup>5</sup>	± 32	± 32	± 21,5	± 29	± 6,0	± 18,5
		10 <sup>7</sup>	± 22	± 26	± 13	± 20	± 1,8	± 11,5
	100% de la d.f.	10 <sup>5</sup>	22 ± 28	26 ± 29	13 ± 17,5	20 ± 25	1,8 ± 5,3	11,5 ± 14,5
		10 <sup>7</sup>	22 ± 19	26 ± 19	13 ± 9	20 ± 13	1,8 ± 1,6	11,5 ± 9
Grain fin  normalisé	0	10 <sup>5</sup>	± 32	± 34	± 23	± 30	± 6,7	± 20,5
		10 <sup>7</sup>	± 22	± 26	± 15	± 20	± 2,1	± 12
	50% de la d.f.	10 <sup>5</sup>	11 ± 29	13 ± 29	7,5 ± 21,5	10 ± 26	1,05 ± 6,5	6 ± 17
		10 <sup>7</sup>	11 ± 19	13 ± 18	7,5 ± 13	10 ± 16	1,05 ± 1,9	6 ± 10
	100% de la d.f.	10 <sup>5</sup>	22 ± 28	26 ± 26	15 ± 20	20 ± 23	2,1 ± 6,5	12 ± 14
		10 <sup>7</sup>	22 ± 17	26 ± 17	15 ± 9	20 ± 11	2,1 ± 1,9	12 ± 7,5
Grain fin trempé et revenu	0	10 <sup>5</sup>	± 33	± 38	± 25	± 32	± 7,5	± 24
		10 <sup>7</sup>	± 22,5	± 32	± 15	± 22	± 2,9	± 14,5
	100 % de la d.f.	10 <sup>5</sup>	22,5 ± 28	32 ± 34	15 ± 17	22 ± 27	2,9 ± 6,3	14 ± 16
		10 <sup>7</sup>	22,5 ± 19	32 ± 25	15 ± 12,5	22 ± 15	2,9 ± 2,1	14 ± 9

RESUME RESULTATS DES ESSAIS DE  
FATIGUE

Annexe 46







ZONES DE SECURITE

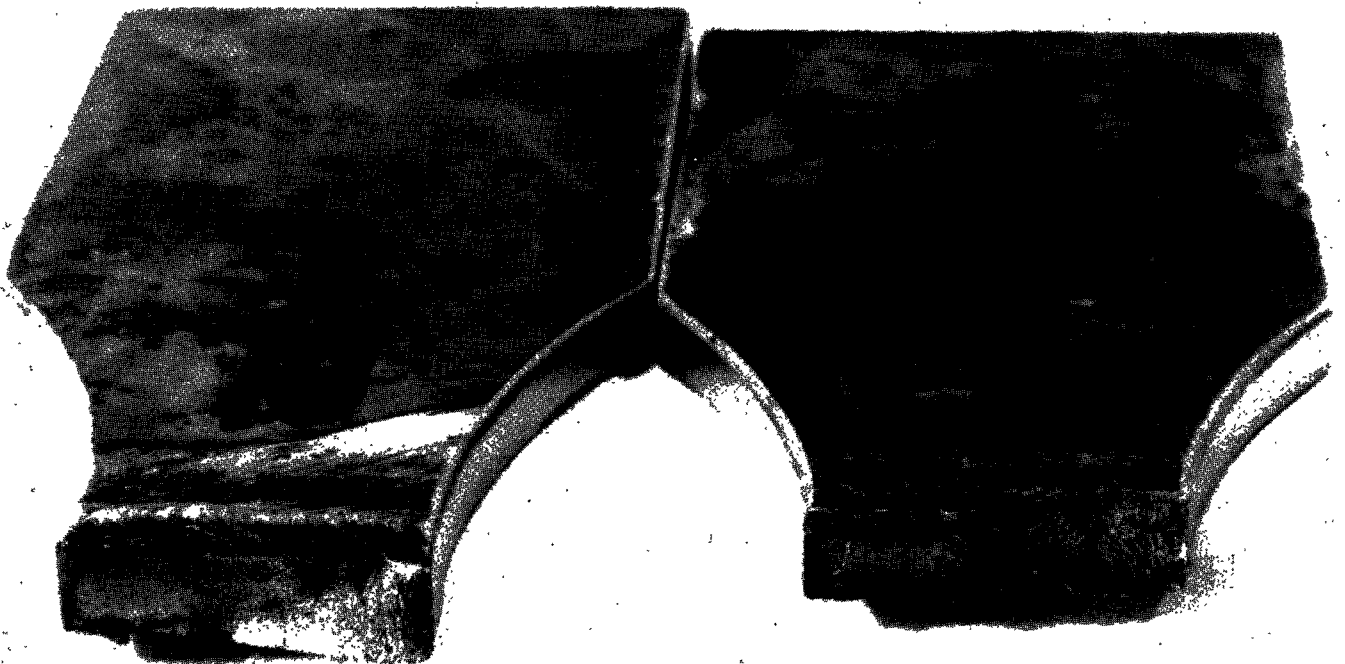
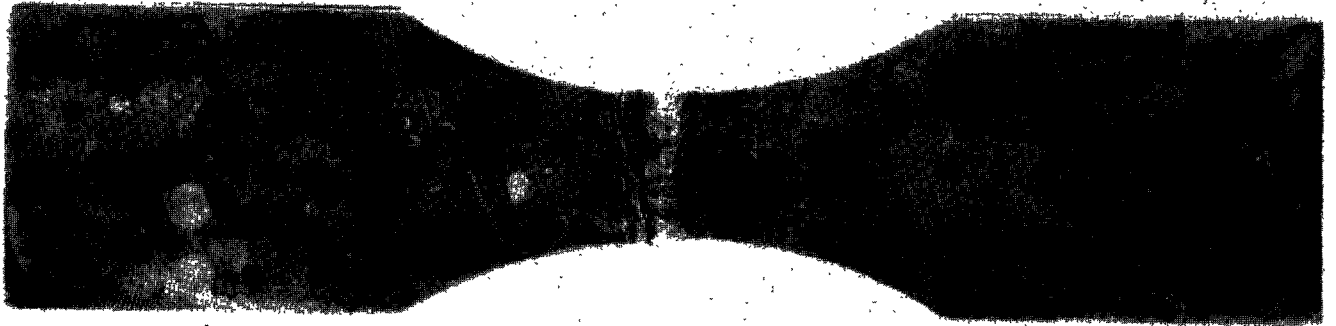
Annexe 49

Annexe 50



Rupture de fatigue d'un échantillon en une pièce

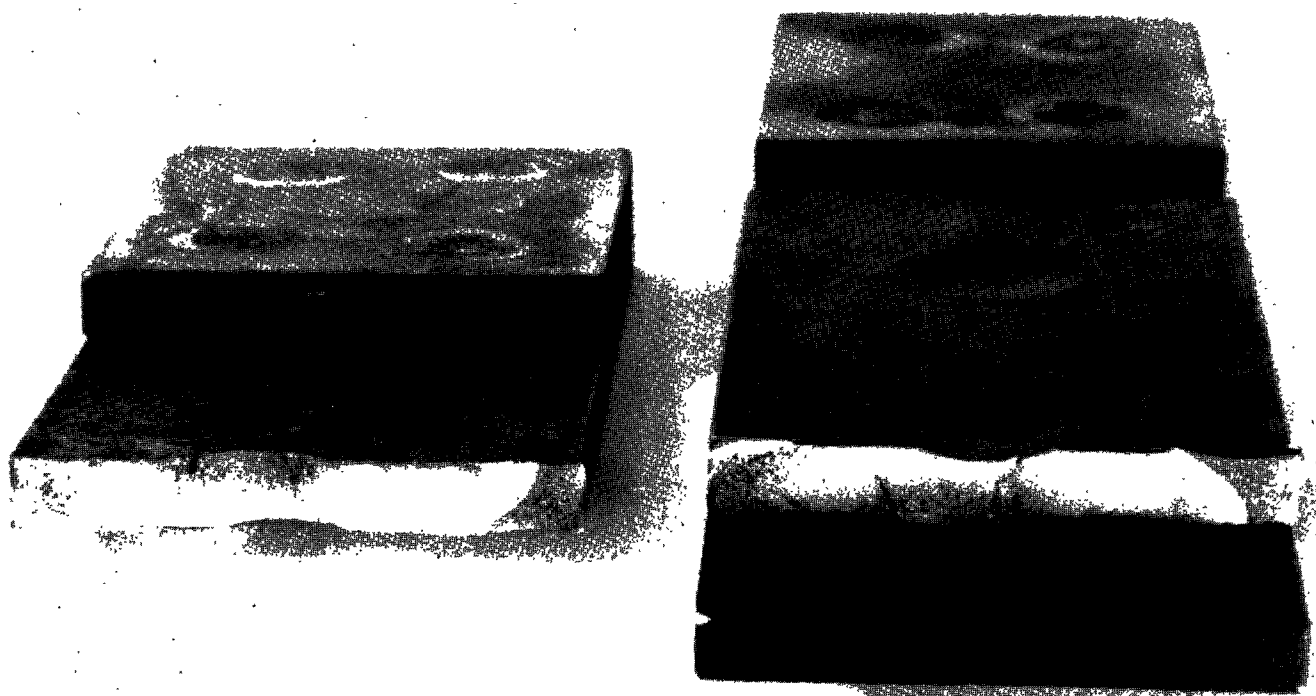
Annexe 51



Rupture de fatigue d'un échantillon soudé bout à bout



Annexe 52



Rupture de fatigue d'un échantillon soudé par points

Annexe 53



Rupture de fatigue d'un échantillon riveté

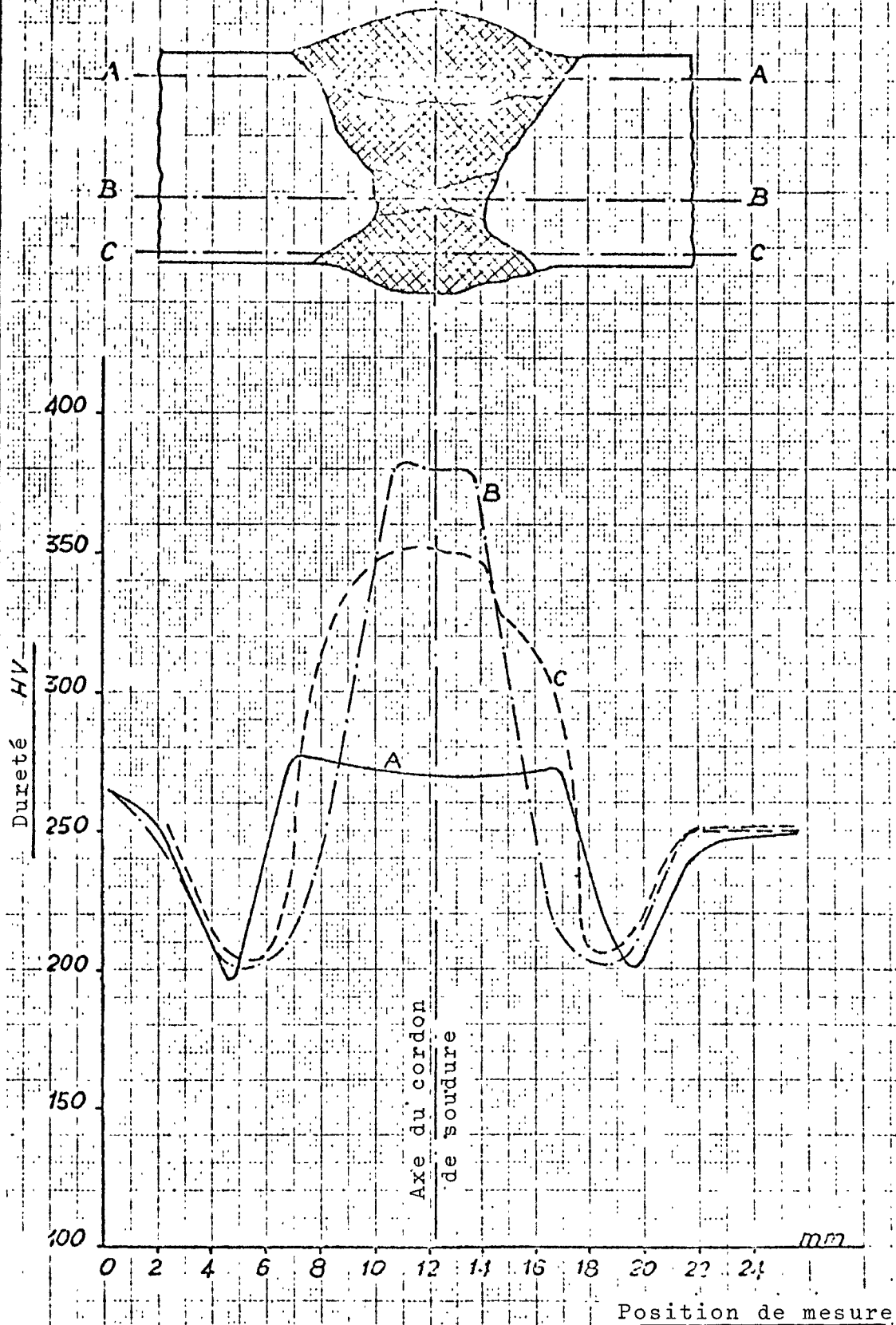
## Annexe 54



Amorce d'une rupture de fatigue dans un  
défaut interne du cordon de soudage  
(échelle 8 ÷ 1)

COURBE DE DURETE DANS LA ZONE DE  
SOUDAGE (tôle trempée et revenue)

Annexe 55



COURBE DE DURETE DANS LA ZONE DE  
SOUDAGE (tôle normalisée)

Annexe 56

